

**Untersuchungen über den Kalksalzgehalt an
verschiedenen Stellen des coxalen
Femurendes**

von
Werner Leonhard Josef Weiß
aus
Amberg



Digitized by the Internet Archive
in 2026

Aus der Orthopädischen Klinik mit Poliklinik
der Universität Erlangen-Nürnberg
Direktor: Prof. Dr. med. D. Hohmann

Untersuchungen über den Kalksalzgehalt an verschiedenen Stellen des coxalen Femurendes

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung der Doktorwürde
dem Fachbereich Medizin
der Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

vorgelegt
von
Werner Leonhard Josef Weiß
aus
Amberg

Gedruckt mit Erlaubnis des Fachbereichs Medizin
der Universität Erlangen-Nürnberg

Dekan: Prof. Dr. E. Rügheimer

Referent: Priv.-Doz. Dr. R. Luther

Korreferent: Prof. Dr. D. Hohmann

Tag der mündlichen Prüfung: 20. Januar 1977

Meinen Eltern in
Dankbarkeit gewidmet

INHALTSVERZEICHNIS

=====

1. Einleitung

Das coxale Femurende ein frühes Untersuchungs-
objekt für die kausale Morphologie

1.1. Problemstellung

2. Bearbeitung des Themas

2.1. Einführung in die Anatomie des Knochens

2.1.1. Compacta

2.1.2. Spongiosa

2.1.3. Osteozyten

2.2. Anatomischer Aufbau und funktionelle Beanspruchung der Spongiosa im Bereich des coxalen Femurendes

2.3. Chemische Zusammensetzung des Knochens

2.4. Untersuchungsmaterial

2.5. Lokalisation der Untersuchungspunkte

2.6. Arbeitsmethode

2.6.1. Präparieren und Röntgen der Knochen- Stücke

2.6.2. Entnahme der Knochenproben

2.6.3. Die Bezugsgrößen Frischgewicht, Trockengewicht und Volumen

2.6.4. Veraschung der Knochenproben

2.6.5. Bestimmung des Kalksalzgehaltes der Knochenproben

2.6.5.1. direkt aus dem Aschegewicht

2.6.5.2. indirekt über die Kalziumkonzentration

3. Ergebnisse

3.1. Konzentrationsangaben

3.1.1. Erklärung der eingeführten Bezeichnungen und Abkürzungen

3.1.2. Vergleich gewichts- zu volumenbezogener Konzentrationsangabe

3.1.3. über die Kalziumkonzentration errechnete Kalksalzwerte

3.2. Ausklammern von fehlerhaften oder unvollständigen Werten

3.3. Einzelwerte aller untersuchten Knochenzylinder

3.4. Mittelwerte

3.4.1. über alle ausgewerteten Knochenzylinder

3.4.2. der einzelnen coxalen Femurenden

3.4.3. der vier verschiedenen Bohrstellen

3.5. Die Zusammensetzung der Spongiosa an verschiedenen Stellen des coxalen Femurendes (Wasser - organische - anorganische Substanz)

3.5.1. ... in Abhängigkeit vom Alter

3.6. Der Kalziumgehalt der veraschten Knochenproben

3.7. Der Kalksalzgehalt an vier verschiedenen Stellen des coxalen Femurendes

3.7.1. ... in Abhängigkeit vom Geschlecht

3.7.2. ... in Abhängigkeit von der Krankenhausaufenthaltsdauer

3.7.3. ... in Abhängigkeit vom Alter

3.7.4. ... in Abhängigkeit vom Caput-Collum-Diaphysen (CCD-)Winkel

4. Diskussion

4.1. Die unterschiedlichen Konzentrationsangaben

4.1.1. Vergleich der volumen- und gewichtsbezogenen Kalksalzwerte

4.1.2. Vergleich der Konzentrationsangaben, die Hydroxylapatit = Asche setzen, mit denen, die über die Kalziumkonzentration errechnet wurden

4.2. Die Zusammensetzung der Spongiosa an verschiedenen Stellen des coxalen Femurendes

4.3. Der Kalziumgehalt der veraschten Knochenproben

4.4. Der Kalksalzgehalt an verschiedenen Stellen des coxalen Femurendes

4.4.1. ... in Abhängigkeit vom Caput-Collum-Diaphysen-(CCD)-Winkel

4.4.2. in Abhängigkeit vom Geschlecht und der Krankenhausaufenthaltsdauer

4.4.3. ... in Abhängigkeit vom Alter

5. Zusammenfassung

6. Literaturverzeichnis

7. Danksagung

8. Lebenslauf

1. Einleitung

Wegen seiner auffälligen Spongiosastruktur hat das proximale Femurende schon früh das Interesse der Wissenschaftler geweckt, die Zusammenhänge zwischen der Gestalt und der Funktion eines biologischen Gebildes vermuten.

Schon W a r d (1838) verglich dieses Knochenstück mit einer kranähnlichen Konstruktion, bei der man Druck- und Zugbündel unterscheiden kann. Die Arbeiten von Jul. W o l f f 1870 und 1892 über das Transformationsgesetz des Knochens ("eine geänderte Funktion führt zu einer umgewandelten Gestalt und Struktur des ursprünglichen Knochens"), stimmen mit der Auffassung von Wilhelm R o u x überein. Dieser prägte 1879 den Begriff der "funktionellen Anpassung"; er versteht darunter "das Vermögen von Lebewesen bzw. ihrer Teile (Gewebe, Organe), sich an gewollte oder ungewollte Änderungen der gewohnten Ausübung ihrer Betriebsfunktionen gestaltlich an diese neue Funktionsweise anzupassen". Diese Anpassung darf nicht in Richtung Evolution gesehen werden. Sie ist organspezifisch und nicht vererbbar. R o u x stellt weiterhin in seinem Maximum-Minimum-Prinzip der Konstruktion fest, daß ein Organ nur dann funktionelle Gestalt und Struktur hat, wenn seine Konstruktion mit dem aufgewendeten

Bau- und Betriebsmaterial das Maximum an Funktion leistet oder umgekehrt, wenn es die erforderliche Funktionsgröße mit dem Minimum an Material oder Energie erreicht.

So gesehen ist der innere Aufbau des Skeletts von konstruktionstechnischen Bedingungen geprägt. Demgegenüber stand zunächst die Meinung, die Biochemie des Skeletts habe entscheidenden Einfluß auf Gestalt und Aufbau des Knochens. Doch zahlreiche Forschungen namhafter Autoren (G e b h a r d t 1906; B e n n i n g h o f f 1927; 1968; K ü n t s c h e r 1936; P a u w e l s 1949, 1965; K u m m e r 1962, 1968; K n i e f 1967 u. a.) haben gerade in neuerer Zeit dazu geführt, daß die Rouxsche Lehre weltweit anerkannt wird.

Dieser biologischen Forschungsrichtung, deren Aufgabe es ist, die organischen Gestaltungsvorgänge auf die wenigsten und einfachsten Wirkungsweisen zurückzuführen und ihre Wirkungsgrößen zu ermitteln, gab R o u x den Namen "Entwicklungsmechanik". Um den biologischen Zusammenhang besser zu erfassen, bezeichnet man diese Wissenschaft heute allgemein als "kausale Morphologie".

Mit Hilfe dieser sog. "interdisziplinären Wissenschaft", die sich modernster technischer, physikalischer und chemischer Arbeits- und Denkmethoden bedient, hat man neue tiefe Einsichten in biologisch-medizinische

Systeme gewinnen können.

Auch für uns bildet sie die breite wissenschaftliche Basis, auf der sich unsere Überlegungen entwickeln.



Abb. 1 : Mazerationspräparat des coxalen Femur-
endes in sechs frontale Schnitte zer-
legt. Die Schnittfolge von links oben
nach rechts unten läßt die unterschied-
liche Spongiosastruktur von dorsal nach
ventral erkennen. (Pat. Hans, S., 47 J.)

1.1. Problemstellung

Betrachtet man das proximale Ende eines gesunden Femurs im Röntgen- oder präparierten Schnittbild (Abb. 1, 2, 7), so fällt eine charakteristische Anordnung der Spongiosabälkchen auf: Am medialen Rand, dem sog. Cadanischen Bogen, zieht die ausgeprägte Corticalis des Schaftes in Höhe der Schenkelhalsmitte in einem gefächerten, dichten Spongiosabündel in den Oberschenkelkopf ein. Ein weiterer Spongiosazug strahlt vom medialen unteren Rand des Caput femoris bogenförmig über die obere Hälfte des Collum zur lateralen Seite des Schaftes, um hier in eine dicke Corticalisschicht überzugehen.

Die Kreuzungsstelle dieser Belastungszüge, der Hüftkopf, weist eine einheitliche, dichte Struktur auf. Auch Teile des Schenkelhalses und der proximalen Diaphyse zeigen eine verstärkte Bälkchenstruktur, während wiederum andere Regionen, besonders zwischen den Hauptbelastungszügen, relativ aufgelockert erscheinen.

Dieses innere Gerüst des Knochens, die Spongiosa, besteht chemisch gesehen aus einem Hydroxylapatit (= HA, = Kalksalz). Da die Spongiosa des coxalen Femurendes nicht überall gleich dicht strukturiert ist, ist anzunehmen, daß auch der Kalksalzgehalt an

verschiedenen Stellen dieses interessanten Knochen-
teiles unterschiedlich hoch sein wird.

Über den absoluten Kalksalzgehalt an verschiedenen
Stellen des coxalen Femurendes sind in der vorlie-
genden Literatur nur bedingt Aussagen gemacht wor-
den, noch liegen Veröffentlichungen über die Frage
vor, in welchem quantitativen Zusammenhang morpholo-
gisch unterschiedliche Spongiosadichten mit dem che-
misch-physikalisch gemessenen Kalksalzgehalt an die-
sen Stellen stehen. Wir wollen mit dieser Arbeit ver-
suchen, diese Fragen näher zu beantworten.

Die Klärung dieser Fragen ist für die Chirurgie und
operative Orthopädie von großem Interesse, da sie
direkte Vergleichswerte über die Stabilitätsverhält-
nisse in den untersuchten Knochenbereichen ergibt. So
könnte aus Untersuchungen über den HA-Gehalt an ver-
schiedenen Stellen des coxalen Femurendes abgeleitet
werden, ob Schenkelhalsnägels oder -platten eine ande-
re als die bisherige Form und Lage aufweisen sollten.

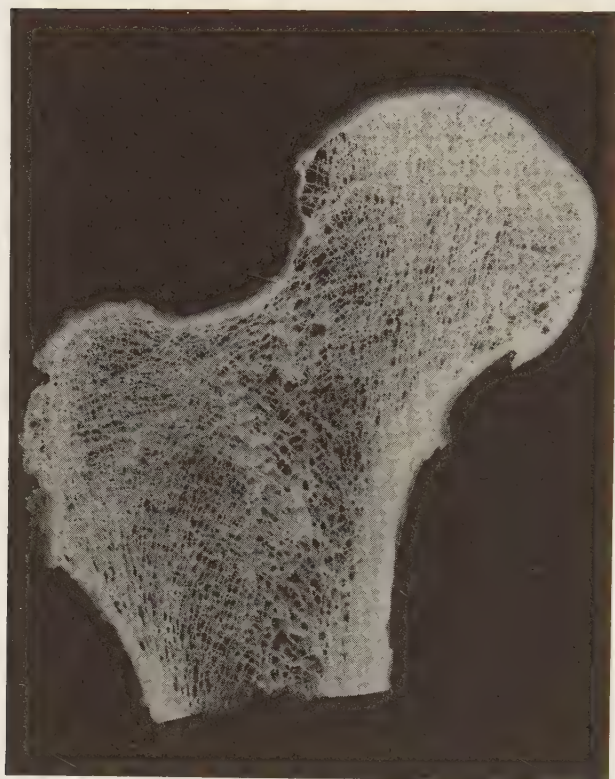


Abb. 2 : Coxales Femurende; Mazerationspräparat,
mittlerer Frontalschnitt (Pat. Hans, S.,
47 Jahre)

Vergleicht man weiterhin eine größere Anzahl Röntgenbilder des proximalen Oberschenkels verschiedener Patienten miteinander, so bemerkt man, daß die obengenannten Spongiosastrukturen sehr unterschiedlich ausgeprägt erscheinen, mehr oder weniger dicht, dicker oder schmaler gebündelt, deutlich oder verwaschen gezeichnet usw. Im Rahmen der "causalen Morphologie" interessieren wir uns für Faktoren, die für diese Differenzierung, d. h. für ev. von der Norm abweichende Kalksalzgehalte verantwortlich sind.

Ob und inwieweit das Geschlecht, das Alter oder ein längerer Krankenhausaufenthalt, der bei Bettlägerigkeit zur sog. Ruheosteoporose führt, die Untersuchungsergebnisse beeinflussen, soll in dieser Arbeit mit erfaßt werden.

2. Bearbeitung des Themas

2.1. Anatomischer Aufbau des Knochens

2.1.1. Compacta (Corticalis)

Der Knochen besteht aus Compacta und Spongiosa. Die Compacta setzt sich aus einem Lammellen-System zusammen, dessen Formelement das Osteon ist; es ist einige mm bis cm lang und besteht aus plattenförmigen, 3-5-11 u dicken Lamellen (Haverssche Lamellen), die ein zentral oder ex-

zentrisch gelegenes Kanälchen umgeben, in dem ein Blutgefäß verläuft.

Die Osteonlamelle wird von zugfesten, in ein halbflüssiges System von Mucopolysacchariden (Grundsubstanz) eingebetteten, aus Polypeptidketten bestehenden Kollagenfasern aufgebaut. Arbeiten von v. E b n e r und G e b h a r d t zeigen, daß die Lamellen nicht gleichgeordnet sind, sondern mannigfaltige Varianten zwischen den Extremen der zirkulären und vertikalen Verlaufsform bilden. So hat K n e s e (1958) eine weitgehende Aufschlüsselung der Steigungsfolge in 8 Stufen vorgeschlagen.

Jedes Osteon hat einen individuellen Bau. Osteone mit gestaltlicher Abweichung liegen oft regellos nebeneinander. Auf der Oberfläche der Kollagenfasern, vielleicht auch im Innern (G l i m c h e r 1960, B a r g m a n n 1967) sind anorganische Kristallite angeordnet. Manche Autoren sprechen von einem Gitterwerk der anorganischen Substanz (B e c h e r et al 1954), andere von einem körnigen Aufbau des Mantels (A s c e n c i 1955). W e b e r , E a n e s und G e r d e s (1967) unterscheiden eine kristalline und amorphe Phase. Die mineralologischen Kristallite bestehen chemisch aus einem Hydroxylapatit. Nach außen und innen wird die Corticalis von den

äußeren und inneren General- oder Tangentiallamellen begrenzt.

Die Corticalis liefert ein anschauliches Beispiel, wie eng anatomischer Aufbau und Funktion miteinander verflochten sind. So leistet die organische Substanz der Osteone (Kollagenfasern) Widerstand gegen Dehnung, die anorganische gegen Druck. Durch die verschiedene Verlaufsrichtung der Kollagenfasern wird eine Erhöhung der Festigkeit bei gleichzeitiger Einsparung von Baumaterial erreicht, entsprechend kreuzweiser Verleimung von Sperrholzplatten. Betrachtet man die Lamellen als Röhren mit einer zylindrisch-schraubig gefaserten Wandung und einem von Lamelle zu Lamelle wechselnden Steigungsgrad der Schraubenlinie, so zeigen sie gegenüber einem parallelfasrig gebauten Körper eine erhöhte Bieigungs- und Abscherfestigkeit; außerdem wird die Einknicktendenz verringert.

Die beiden funktionsverschiedenen Komponenten des Lamellensystems (zugfeste Kollagenfaser, druckfester Kristallit) sind in demselben Gewebe eng gekoppelt. Diese Art "Spannungsbeton" verleiht nach der Auffassung von K n e s e (1958) der Kollagenfaser auch ohne Belastung bereits einen gewissen "Vorspann". Durch diese zusätzliche Zugspannung erhält nicht nur

die an sich zugfeste Faser eine gewisse Druckfestigkeit, sondern es wird auch die Gefahr eines sofortigen "Ausknickens" der Kollagenfaser bei axialer Belastung verringert.

C a t e l (1970) fand bei seinen Untersuchungen, daß die Corticalis in denjenigen Zonen, wo Muskeln inserieren, auffallend dünn ist und an Stelle der Haversschen Lamelle die Tangentiallamellen ganz überwiegen. Daraus folgerte er, daß der Widerstand gegen Zugwirkung der Muskulatur nicht von den Osteonen, sondern hauptsächlich von den Tangentiallamellen geleistet wird.

2.1.2. Spongiosa

Die Spongiosa kann man als Fortsetzung der Corticalis nach dem Inneren des Knochens zu betrachten. Im Gegensatz zu ihrer rein morphologisch-descriptiven Einteilung (H e n l e, 1840; H y r t l, 1873) wollen wir die Spongiosa aus morphologisch-funktionellen Gesichtspunkten betrachten. H. v. M e y e r unterschied 1882 zwei funktionelle Formtypen der Spongiosa, den rundmaschigen und den Längslamellentyp. Der erste sollte allseitigem, der andere axialem Druck oder Zug Widerstand leisten.

Diese Gliederung erfuhr durch R o u x 1922 eine weitgehende Aufschlüsselung. Als kleinste Formeinheiten (statische Elementarteile) mit typischer Gestalt und Funktion beschrieb er Knochenröhrchen und -bälkchen, Kugelschalen (pilae osseae) und statische Plättchen (lamellae staticae). Aus diesen Formelementen setzen sich die nächst höheren Einheiten, die Spongiosatypen (formationes substantiae spongiosae osseae) zusammen, die in 3 Arten unterteilt werden können:

1. Röhrchenspongiosa,
2. Plattenspongiosa,
3. Maschenspongiosa

2.1.3. Osteocyten

Den Knochen durchzieht ein dichtes Netz von Knochenzellen (Osteocyten). Es sind plattgedrückte ovoide, mit sehr zahlreichen, sich verzweigenden Ausläufern versehen, membranlose Zellen. Die Ausläufer benachbarter Zellen stehen untereinander in Verbindung. Die Knochenzellen liegen zwischen den Havers'schen Lamellen, zum Teil in diesen selbst und zwar derart, daß ihr längster Durchmesser den Kollagenfasern parallel verläuft.

2.2. Anatomischer Aufbau und funktionelle Belastung der Spongiosa im coxalen Femurbereich

Die Leistung der Röhrenspongiosa soll in starken Widerstand bei Beanspruchung in einer Haupt-
richtung (Röhrchenrichtung) bestehen.

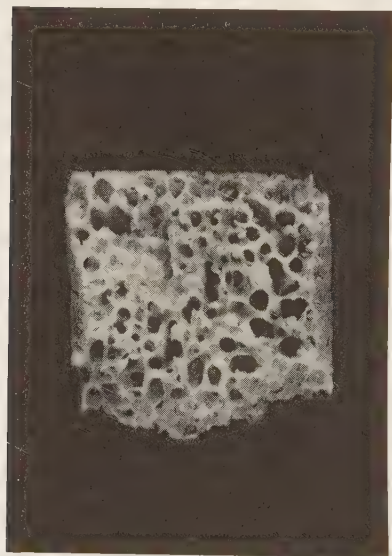


Abb. 3 : Maschenspongiosa; Veraschungspräparat aus
dem Oberschenkelkopf (Bohrstelle).
(Pat. Klaus W., 38 J.)

Die Plattenspongiosa, deren Platten durch querstehende Plättchen oder Bälkchen miteinander verbunden sind, findet für Druckkonstruktionen Verwendung.

Die Maschenspongiosa (abb. 3), die aus schmalen, rundlich-netzförmig angeordneten Bälkchen und Plättchen besteht, ist in Folge ihrer Gestalt in jeder Richtung gleich widerstandsfähig. Durch vollkommen runde und enge Ausbildung der Maschen (spongiosa globata oder pilosa) wird die Verbindung und damit die Stabilität verbessert. Diese Spongiosaform findet man im Kopfteil von Kugelgelenken dicht unter der Gelenkoberfläche, um dem in diesem Bereich häufigen Wechsel der Beanspruchungsrichtungen nach allen Seiten zu begegnen. Die Maschenweite nimmt in jedem Knochen von der unter dem Gelenkknorpel liegenden Druckaufnahmeplatte gegen das Innere des Knochens an Größe zu. Die variable Dicke dieser Platte hat keinen deutlichen Einfluß auf die Maschenweite der sie stützenden Spongiosa. Kinetische Energie (diskontinuierliche Stoßwirkung) scheint eine Verdichtung der soliden Druckaufnahmeplatte sowie die Bildung einer engmaschigeren Spongiosa zur Folge zu haben.

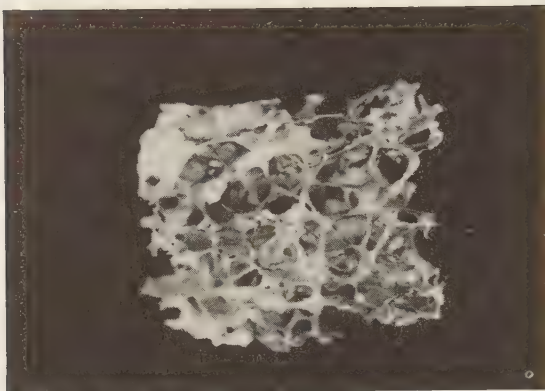


Abb. 4 : Plättchenspongiosa
 Man erkennt ein lockeres Gitterwerk, das aus Knochenplättchen und Verbindungsbälkchen aufgebaut ist. (Pat. Klaus W., 38 J.)

Bereits makroskopisch, deutlicher im Röntgenbild, können auf Schnitten des coxalen Femurendes eigentümliche zusammenhängende Spongiosazüge unterschieden werden; auf Abb. 1 ist das bereits erwähnte, von Ward 1838 beschriebene mediale Druck- und laterale Zugbündel zu erkennen. Roux bezeichnete 1885 derartige gebündelte Spongiosazüge als Trajektorienstrukturen. Er gab den in der Mathematik deskriptiv gebrauchten Begriff "Trajektorien" für Liniensysteme

die sich unter einem konstantem Winkel schneiden (meist 90 Grad), in Anlehnung an den in der Statik gebräuchlichen Terminus "Spannungstrajektorien" eine funktionelle Bedeutung: Trajektorienstrukturen sind solche, die nur die Richtungen der stärksten statischen und dynamischen Beanspruchungen durch fungierende Substanzen (stärkste Zug- oder Druckspannungen) verkörpern. Die auf eine einzige, eindeutig determinierte Beanspruchung (Z e i g e r, 1933) ausgerichtete Funktion wird mit dem auf die Trajektorien reduzierten Material geleistet; eine andere Beanspruchung führt zu einer anderen Trajektorienstruktur.

Trajektorien können in Abhängigkeit von der Beanspruchung einen geraden oder gebogenen Verlauf haben. Zug- und Druckkurven stehen nach R o u x rechtwinkelig aufeinander, Scherkurven schneiden die Trajektorien in einem Winkel von 45 Grad.

Wie die Osteonlamelle ist auch die Substantia spongiosa nach dem Prinzip eines sogar mehrfachen Verbundbaues konstruiert: Es besteht einerseits der Verbund Kollagenfaser/anorganische Substanz, andererseits der Verbund Knochensubstanz/Knochenmark (K n e s e , 1958).

Die Dicke der statischen Elementarteilchen ändert sich normalerweise nicht viel in Richtung von der

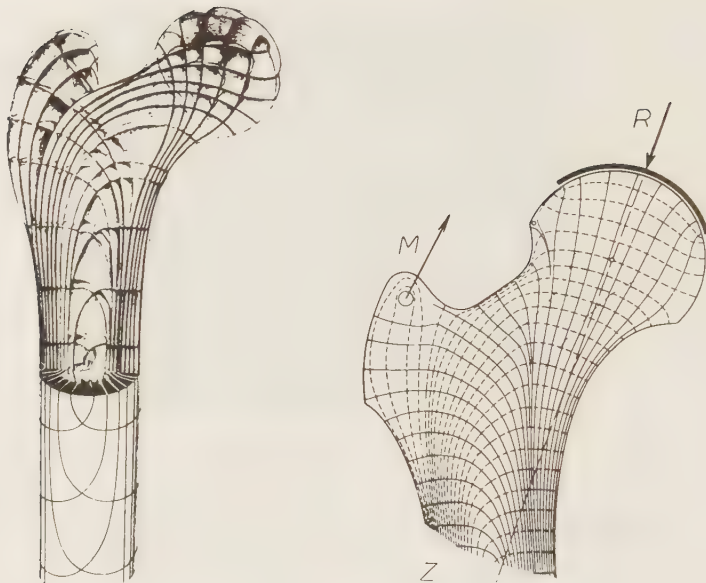


Abb. 5 : Links: Theoretische Konstruktion von drei sich rechtwinklig schneidenden Plattensystemen in einem Modell des proximalen Femurendes. Diese Plattensysteme solle in verschiedenen Ebenen die gleichen Schnittbilder zeigen wie die Spongiosa im Femur (nach K u m m e r, 1962)

Rechts: Schematisiertes Trajektorienbild

M = Muskelkraft der Adduktoren, R = resultierende Druckrichtung (geht durch den Schwerpunkt = Drehzentrum des Schenkelkopfes), Z = Zugbündel (nach P a u w e l s, 1965).

engmaschigen Spongiosa unter der Druckaufnahmeplatte nach der weitmaschigen Spongiosa in der Nähe der Markhöhle. Es besteht aber eine Korrelation zwischen ih-

rer Dicke und der Größe ihrer Beanspruchung.

J. W o l f f (1870, 1892) und R o u x (1885, 1895) vertraten die Auffassung, daß alle statischen Elementarteile sowie alle daraus gebildeten Spongiosatypen unter neuen Beanspruchungen neue Strukturen bilden können, sofern ihnen in der Wirkungsdauer keine Schranken gesetzt werden. Die Spongiosa kann wie jeder feste Körper in drei Richtungen beansprucht werden und sich entsprechend einer räumlichen Beanspruchung an eine dieser Änderung entsprechenden Richtung adaptieren.

Neuere Untersuchungen von C a t e l (1970), die Spongiosastruktur durch Einmessung der Bälkchenrichtung auf zahlenmäßiger Grundlage zu erfassen, erlauben quantitative Aussagen über deren Struktur und ihrer Beziehung zur Funktion. Indem er an ventro-dorsalen Dünnschliffen des coxalen Femurendes die Winkel aller markanten Spongiosazüge bestimmte, kam er zu folgenden Schlußfolgerungen:

- a) "Die Anordnung der Spongiosabälkchen in ventro-dorsaler Richtung desselben Knochenabschnittes ist keineswegs übereinstimmend" (Abb. 6). So lassen röntgenologische oder densitometrische Übersichtsaufnahmen vom Oberschenkel keine genauen Schlüsse auf Struktureinheiten zu, leiten eventuell durch einen Summationseffekt zu Fehldeutungen.

- b) An keiner Stelle der Spongiosa im Bereich des Femurschaftes und -halses ließen sich Strukturen finden, die zur Aufnahme von Biegebeanspruchungen dienen, wie von mehreren Autoren angenommen wurde (R o u x 1895; K u m m e r 1962; P a u w e l s 1965). Es handelt sich hierbei um Trajektorien, die mit senkrecht auf der Corticalis stehenden Spongiosazügen beginnen, im rechten Winkel kontralaterale Züge kreuzen und im distalen Femurabschnitt wieder senkrecht an der Corticalis endigen (Abb. 5). Auf Grund seiner Untersuchungen können nur Corticalisosteone des Femurschaftes erkennbaren Widerstand gegen Biegebeanspruchung leisten.
- c) Die Substantia spongiosa leistet in drei großen Trajektorien der Druck- und Zugbeanspruchung des Femurs Deformationswiderstand. Diese Trajektorien werden als Trajectorium rectum mediale (gegen Druckbeanspruchung), Trajectorium rectum laterale (gegen Zugbeanspruchung) und Trajectorium repri-mens (gegen Druckbeanspruchung) bezeichnet (Abb.6).

Auf das coxale Femurende wirken primär zwei Kräfte ein: Einmal das über Wirbelsäule und Becken auf die Hüfte übertragenen Gewicht des Rumpfes, zum anderen die Zugkraft der am Trochanter major inserierenden

Abductorenmuskeln.

Der Druckkraft setzt der Knochen auf dreifache Weisse Deformationswiderstand entgegen:

1. Die schon oben erwähnte Spongiosa pilosa, eine engmaschige, aus seitlich miteinander verschmolzenen Kugelschalen gebildete Form (Abb. 3) leistet richtungswechselndem Druck Widerstand.
2. Das von Ward bereits 1838 beschriebene mediale Druckbündel zieht, vom Femurkopf radialstrahlig ausgehend, gefächert auf der medialen Seite des Femurhalses abwärts zur Corticalis des oberen Schaftes (Abb. 6).
3. In der Knochenmitte sind sowohl röntgenologisch als auch auf Dünnschliffen Spongiosazüge zu erkennen, die nach Art eines mit der Spitze proximalwärts gerichteten Kegels angeordnet sind und typische Form für eine Druckkonstruktion zeigen (= Trajectorium reprimens).

Der erheblichen Zugkraft der Abductorenmuskulatur wirkt eine ebenfalls deutliche spannungstrajektorielle Struktur entgegen, die korrespondierend mit dem medialen Druckbündel auf der lateralen Seite des coxalen Femurendes von der Spitze des Trochanter major bis in den Corticalisbereich des Femurschaftes herabzieht (Abb. 6).

In der Übergangsregion von Femurschaft in Femurhals treten schräg abwärts ziehende Spongiosazüge auf, die früher als Zugtrajektoren aufgefaßt wurden (Abb. 6). Catel glaubt, daß "sie zusammen mit den sie kreuzenden, schräg aufwärts gerichteten Spongiosazügen als ein System einer schrägen Pressung, im Sinne der zweischarigen, affinen, ungleichartigen Zergleitung bei Gesteinsdeformation zu deuten" wären, d. h. parallel einer potentiellen Verschiebungsfläche verlaufende Schubspannungen darstellen.

2.3. Die chemische Zusammensetzung des Knochens

Der Knochen, das differenzierteste Stützgewebe des Körpers besteht neben einer organischen Grundsubstanz und Wasser in der Hauptsache aus organischen Salzen (Hoppe-Seyler/Thierfelder). Die Frage in welcher Form dabei die Mineralsubstanz vorliegt, ist nicht endgültig geklärt. Vielfach nimmt man heute an, daß die Calcium-, Phosphor- und Magnesiumsalze einen Hydroxylapatit bilden (Brandenburger, Schinz, 1948; Schütte, 1963; Bourne, 1956). Dallmagne und Mitarbeiter vertreten dagegen die Ansicht, daß im wesentlichen ein Doppel-

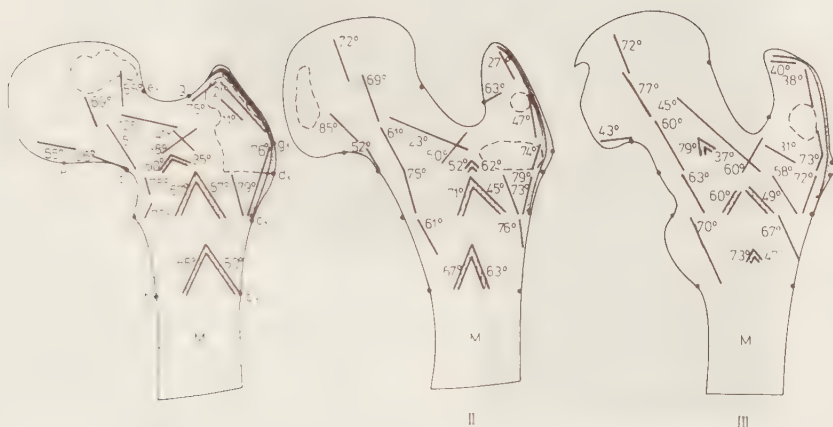
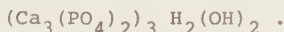


Abb. 6: Die nach Einmessung der Richtung aller markierten Spongiosabälkchen errechneten Durchschnittswerte ihrer Verlaufsrichtung sind winkelgetreu dargestellt. Hieraus konstruierte man die wichtigsten Trajektorien des coxalen Femures eines Erwachsenen: links = trajektorium rectum mediale, rechts = trajektorium rectum laterale, spitzwinklig, vertikalschraffiert = trajektorium reprimens, in der Mitte = Zugbündel oder wahrscheinlich zweischarige affine Zergleitung bei Schubbeanspruchung, gestrichelt umrandet = spongiöse Verdichtungsbezirke.
I = ventraler, II = mittlerer, III = dorsaler Frontalschnitt (nach C a t e l 1970)

salz folgender chemischer Verbindung vorliegt:



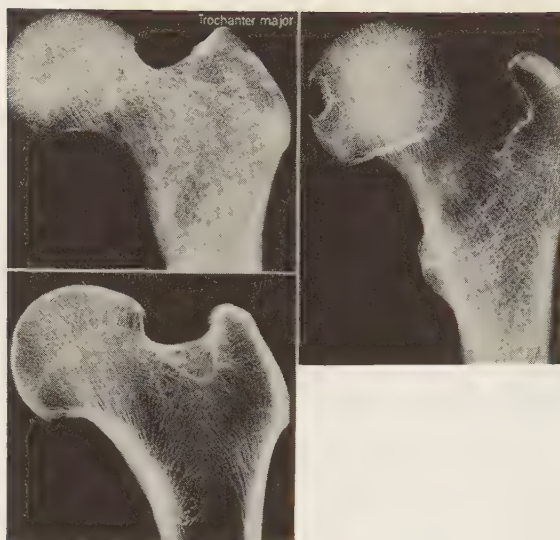


Abb. 7 : Röntgenogramme des coxalen Femurendes
eines Erwachsenen a = neutraler, b =
mittlerer, c = dorsaler Frontalschnitt
(aus C a t e l)

Eine neuere Arbeit von S c h ü t t e (1973) gibt an, daß die Mineralsubstanz morphologisch hexagonale Kristallformen und chemisch einen Hydroxylapatit der Formel $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ bildet. Da nebenbei noch andere Bestandteile in der Knochenasche auftreten, nimmt er als allgemeine Formel für den Apatit im Knochen an:



Die neben den Hauptionen Ca^{2+} und PO_4^{3-} auftretenden Elemente, wie Na, K, Mg, CO_3 , Fe, können als

echte isomorphe Bindung im Kristallgitter, Bindung an der Oberfläche der Kristalle oder Adsorption an der Oberfläche diskutiert werden. Beachtenswert ist Schüttes Aussage, daß das Gewichtsverhältnis Ca/P unabhängig von Alterungsprozessen und Krankheiten konstant 2,26 sei.

Quantitativ gibt Schütte für das Knochenmineral folgende Zusammensetzung an. Dabei ist zu berücksichtigen, daß Phosphor im Knochen und in der Asche nicht elementar, sondern als Phosphat auftritt, und in dieser Aufstellung der Sauerstoffanteil einiger Moleküle vernachlässigt wird.

Ca	35-37 % des Aschengewichtes	
P	15-17 %	- " -
CO ₃	4,4-5,7 %	- " -
Ba	0,9 %	- " -
Mg	0,5-0,7 %	- " -
K	0,16 %	- " -
Cl	0,08 %	- " -

Nach Weber, Eanes und Gerdes (1967) lautet die Formel $\text{Ca}_5((\text{OH},\text{F})(\text{PO}_4)_3)$.

Diese Formel gibt die Hauptmineralien an, die bei einer Veraschungstemperatur von 720-750 Grad Celsius zurückbleiben. Da für unsere späteren Betrachtungen Strukturprobleme über den Apatitkristall nicht ent-

scheidend sind, und wir uns nur für das Gewichtsverhältnis der Elemente untereinander interessieren, werden wir auf diese letzte Formel zurückgreifen, da sie unseren Anforderungen genügt.

Allgemein setzt sich der Gesamtknochen etwa folgendermaßen zusammen: 50-60 % Mineralsubstanz, 25 % organische Bestandteile, 13-15 % Fett und 10 % Wasser (B o u r n e, 1956). Diese Werte sind von Alter, Krankheit und Ernährungszustand abhängig. Sie können auch bei den einzelnen Knochentypen stark differieren.

2.4. Untersuchungsmaterial

Es wurden 54 menschliche Oberschenkelknochen untersucht.¹ Diese coxalen Femurenden mit 15 cm langem diaphysärem Stumpf stammten aus einem Kollektiv, aus dem Patienten ausgeschlossen waren, deren Anamnese osteoporotische oder osteosklerotische Knochenprozesse vermuten ließ. Logischer Weise sind bei unserem Untersuchungsmaterial die jüngeren Jahrgänge unterrepräsentiert. Jedoch bieten die Knochen von zwei jungen

¹ Wir danken Herrn Prof. Dr. Pließ (Direktor der Pathologischen Abteilung der Städt. Krankenhäuser Nürnberg) für die Bereitstellung des Untersuchungsmaterials.

Männern (19- bzw. 28 Jahre alt) interessante Vergleichsmöglichkeiten gegenüber der Hauptmasse unseres Materials, das von Patienten des Pensionsalters stammte.

Von den 54 ursprünglich untersuchten Knochen entfielen 29 auf männliche, 25 auf weibliche Patienten.

Von jedem Knochen wurde Alter, Geschlecht, die vor dem Exitus eruierbare Bettenverweildauer und die klinische und pathologische Diagnose vermerkt.

2.5. Lokalisation der Untersuchungspunkte

Um vergleichende Aussagen über den Kalksalzgehalt an verschiedenen Stellen des coxalen Femurendes machen zu können, müssen zunächst diese Stellen reproduzierbar festgelegt werden. Die Probenentnahme wurde mit Hohlbohrer definierter Stärke vorgenommen. Wir wählten topographisch charakteristische Stellen, d.h. Stellen, die auf Grund unserer Überlegungen am Röntgenbild unterschiedliche Kalksalzwerte erwarten ließen. Wir lokalisierten eine Bohrstelle in den Oberschenkelkopf, in die dicht strukturierte Spongiosa pilosa der Druckaufnahmeplatte, 2 cm vom Rand des Caput entfernt in Verlängerung der Schenkelhalsachse.



Abb. 8: Mazerationspräparat des coxalen Femurendes mit eingezeichneten Bohrstellen.
 Gerade A = Schenkelhalsachse
 Gerade B = Diaphysenachse
 Gerade C = Lot auf die Schenkelhalsachse in der Mitte des Schenkelhalses,
 gestrichelte Linien = Konturen von Caput femoris bzw. Trochanter major,
 I, II, III, IV = durch A und C entstehende Felder

Um genau definierte weitere Lokalisationen zu erhalten, bezogen wir uns wieder auf die Schenkelhalsachse (Abb. 8). Auf dieser Achse errichteten wir ein Lot durch die Mitte des Collum, so daß die Felder I, II, III und IV entstanden (Abb. 8).

Die zweite Bohrstelle legten wir in das Feld I und hofften damit den früher als Zugbündel bezeichneten, von C a t e l aber als zweischarige affine Zergleitung bei Schubbeanspruchung erkannten Spongiosazug (Abb. 6) zu erfassen.

* Auf Röntgenbildern fällt im Gebiet des Feldes III ein relativ strukturarmes Spōngiosa-"Loch" auf (Abb. 7). Ob sich dieser röntgenologisch deutlich erkennbare Strukturmangel (= Wardsches Dreieck) zahlenmäßig beim Vergleich mit den anderen Bohrstellen ausdrückt, galt unser Interesse; somit war Entnahmestelle 3 in dieser Region lokalisiert.

Diese beiden letzten Bohrstellen sollten möglichst nahe an die Geraden A und C, d.h. in den Scheitelpunkt der gebildeten rechten Winkel gelegt werden.

Als vierte Entnahmestelle definierten wir die Mitte der Linea intertrochanterica, ein Gebiet, das von der affinen Zergleitung und dem Trajectorium reprimens (Abb. 6) beherrscht wird und eine klare feine Spongiosazeichnung bietet. Mit dieser Stelle aus dem Übergang Schenkelschaft - Schenkelhals, die von zwei Hauptkräften beansprucht wird, von Druck und Schub, hatten wir wieder einen guten Vergleichspunkt zu den "einseitig" belasteten Punkten im Schenkelhals. Untersuchungswert erschien die Frage,

inwieweit sich diese unterschiedliche Belastungsweise auch zahlenmäßig in einem variierenden Hydroxylapatitgehalt ausdrückt.

2.6. Arbeitsmethode

Für unsere spezielle Fragestellung entwickelten wir eine Versuchsanordnung¹, die wir teilweise aus Arbeiten von H e u c k (1960); S c h m i d t (1974); L u t h e r (1975) ableiteten.

Jeweils 4-5 coxale Femurenden wurden von den Weichteilen freipräpariert und anschließend ohne AT geröntgt. Dann wurden die einzelnen Proben gebohrt und in Porzellanschälchen gebracht. Das Frischgewicht bestimmten wir sofort nach der Bohrung. Am Ende dieses 1. Arbeitstages stellten wir die Proben für 3 Tage in den Trockenschrank.

Der 2. Arbeitsgang begann mit der Messung des

¹ Für die Hilfe bei der Entwicklung der einzelnen Arbeitsgänge danke ich Fr. Dr. v. Aufseß vom Physiol.-chem. Institut (Dir.: Prof. Dr. W. Kersten) und den Herren Dipl.-Chem. Hüller, Dipl.-Chem. Schaper, Dipl.-Chem. Schlenker vom I. anorg. Institut für Chemie (Dir.: Prof. Dr. H. Behrens).

Trockengewichtes und der Volumenbestimmung. Daraufhin wurden die Proben verascht, im Exsiccator abgekühlt und die entstandene Asche gewogen. Man zermörserte dann die einzelnen Aschezylinder und löste eine eingewogene Menge Asche in einer verdünnten Salzsäurelösung.

Im 3. Arbeitsgang wurde der Kalziumgehalt dieser Aschelösungen mit Hilfe eines Flammenphotometers bestimmt. Die Werte der bearbeiteten Knochen wurden tabellarisch aufgezeichnet und später auf Lochkarten gestanzt.

2.6.1. Präparieren und Röntgen der Knochenstücke

Die von der Pathologie gelieferten Knochen wurden in der Tiefkühltruhe gesammelt, um dann zusammen 4 bzw. 5 Knochen bearbeiten zu können. Zuerst präparierten wir die Femurenden von Muskeln und Sehnen frei. Anschließend fertigten wir von jedem Knochenstück ein Röntgenbild an. Um reproduzierbare Bedingungen zu bekommen, lagerten wir alle Knochen mit einer Antetorsion von 0 Grad und schossen die Röntgenaufnahmen mit einer Dosisleistung von 55 kV, 200 mAs. Eine starke Antetorsion, wie sie ev. physiologischer Weise vorkommt, kann

im ap-Röntgenbild einen steileren Caput-Collum-Diaphysen (CCD-) Winkel vortäuschen als er in Wirklichkeit ist.

Diese Korrektur war noch in zweiter Linie wichtig, da wir über das Röntgenbild von jedem coxalen Femurende den CCD-Winkel bestimmten. Wir nahmen nämlich an, daß dieser Winkel einen Einfluß auf den Verlauf der Spongiosazüge haben und damit die Kalksalzwerte an den Untersuchungsstellen verändern könnte.

2.6.2. Entnahme der Proben

Um aus dem Knocheninneren Spongiosaproben zu bekommen bedienten wir uns eines Hohlbohrers¹ von definiertem Innendurchmesser und ausreichender Länge (140 mm), um das Caput femoris in seiner ganzen Breite durchbohren zu können.

Die präparierten distalen Oberschenkelenden wurden in einen Schraubstock waagrecht eingespannt und mit einer Standbohrmaschine sagittal bei einer Antetorsion von 0 Grad von ventral nach dorsal durchbohrt. Von den erhaltenen Gesamt-Bohrzylindern schnitten wir jeweils ein 10 mm langes Mittelstück heraus

¹ Unser Dank gilt der Fa. Siemens, Erlangen, die diesen Bohrer für uns herstellte.

und legten es in nummerierte Porzellanschälchen.

Da die Strukturen in verschiedenen ventrodorsalen Schichten des coxalen Femurendes voneinander abweichen (Abb. 1, 6, 7), haben wir auf diese Weise vergleichbare Versuchsbedingungen geschaffen.

2.6.3. Die Bezugsgrößen Frischgewicht, Trockengewicht und Volumen

Bei den gängigen Mineralbestimmungen des Knochens, wie z.B. in den Arbeiten von H e u c k (1960), S c h m i d t (1974) und L u t h e r (1975), haben die Untersucher ein bestimmtes Volumen oder Gewicht verascht, den Ascherückstand mit Hydroxylapatit gleichgesetzt und daraus den HA-Gehalt des Knochens pro Volumen- bzw. Gewichtseinheit errechnet.

In der uns vorliegenden Literatur waren die Kalksalzwerte vornehmlich in der Konzentration mgHA/ml Frischknochen angegeben, d.h. auf das Volumen bezogen. Aus Gründen einer größeren Meßgenauigkeit führten wir noch zwei gewichtsbezogene Konzentrationsangaben ein, die als Kalksalzgehalt pro Frisch- bzw. Trockengewicht definiert waren.

Die eben gebohrten, mittleren Knochenzylinder wurden in nummerierte Porzellanschälchen ge-



Abb. 9: Röntgenbild eines frisch gebohrten
coxalen Femurendes.

legt, deren Leergewicht vorher bestimmt worden war. Dann wog man die Schälchen mit den frischen Knochenproben. Aus der Differenz erhielt man das Frischgewicht.

Da das beim Bohren austretende Blutserum und Gewebwasser in unterschiedlichem Maße mit den Knochenzylindern in das Schälchen übertragen wird, glaubten wir, durch Abdampfen dieser Flüssigkeiten diese Fehlerquelle kleiner halten zu können. Wir ließen deshalb die Schälchen mit den Proben 72 Stunden bei 110 Grad Celsius im Trockenschrank. (Die Porzellantiegel waren vorher ausgeglüht worden, um ihren Eigenwassergehalt

zu verdampfen und die Glasur zu härten.) Nach dem Abkühlen im Exsiccator wogen wir die Schälchen mit den getrockneten Knochenstückchen und die Differenz mit den leeren Tiegeln ergab das Trockengewicht.

Alle Gewichtsbestimmungen wurden auf einer Analysenwaage der Fa. Sartorius gemacht, die eine Meßgenauigkeit von 10^{-5} g erlaubte.

Was die Volumenmeßmethode betrifft, so maßen

S c h m i d t K. W. (1974) und S c h ü r g e r (1974)

die Länge der erhaltenen Knochenzylinder mit einer Schublehre oder Mikrometerschraube. Der Durchmesser der Zylinder ist durch den Präzisionshohlbohrer gegeben. Mit Hilfe der Formel $r^2 h$ errechneten sie mit den gemessenen Werten das Volumen aus.

Wir wollten diese wenig aufwendige Methode übernehmen.

Aber es erwies sich als äußerst schwierig, die Kanten der Knochenzylinder beim Herausnehmen der Mittelstücke exakt und ohne Absplittern einiger Ecken abzuschneiden. So erhielten wir selten regelmäßige Zylinder und mußten deshalb diese Volumenmeßmethode aufgeben.

Aus diesem Grunde übernahmen wir eine Arbeitsanleitung von H e u c k (1960), der das Volumen von Knochenstückchen mit Hilfe der Wasserverdrängung bestimmte:

Wir verbanden ein Glasrohr über einen halbstarren

Plastikschlauch mit einer geeichten Meßpürette und füllten das System bis zu einem bestimmten Punkt mit Wasser auf. In das Glasrohr brachten wir Körper definierter Volumina, maßen den Anstieg der Wassersäule an der Pürette ab und eichten auf diese Weise das Gerät. Genauso wurden dann die Knochenstücken in das Glasrohr gelegt, der Wasseranstieg abgelesen und mit Hilfe einer Umrechnungstabelle das Volumen errechnet.

Da die Spongiosastücke durch die Luft in den Poren normalerweise auf dem Wasser schwimmen, mußten sie vorher mit Unterdruck entgast werden: Sie wurden in ein wassergefülltes Gefäß gelegt, das solange mit der Wasserstrahlpumpe evakuiert wurde, bis die zuerst schwimmenden Knochen untertauchten.

Da die Proben vor der Volumenmessung getrocknet wurden, das flüchtige Fett somit die Spongiosaporen beim Abkühlen besser abdichtete, glaubten wir den Faktor der inneren Benetzung vernachlässigen zu können und betrachteten die Knochenteilchen als Körper ohne innere Benetzungsoberfläche.

2.6.4. Veraschung der Knochenproben

Die Veraschung ist grundsätzlich die Methode der Wahl, die organische Substanz des Knochens zu entfernen zur späteren Analyse der anor-

ganischen Bestandteile. Dabei unterscheidet L a n g zwei Hauptmöglichkeiten: 1. die "Veraschung auf nassem Wege", die heute häufig angewandt wird und genaue Analysen der Kat- und Anionen erlaubt. Da sie einen großen speziellen apparativen Aufwand erforderte, war sie für unsere Bedingungen nicht geeignet. 2. die "Veraschung auf trockenem Wege", bei der die Proben in einem Muffelofen verbrannt werden. Wir entschieden uns für diese Methode, weil sie, die obigen Nachteile ausklammernd, den großen arbeitstechnischen Vorteil bot, mehrere Proben gleichzeitig bearbeiten zu können.

Bei der trockenen Veraschung gibt man die Proben in Schälchen ausreichender Größe, da sich das organische Material beim Beginn der Veraschung aufbläht und anorganische Partikelchen mit sich reißt. Da wir mit einer größeren Anzahl von Tiegeln arbeiteten, verzichteten wir auf Platingeräte und führten Porzellantiegel von 25 mm Durchmesser und 60 mm Höhe ein. Um ihre Glasur zu härten und ihre hygroskopische Neigung zu senken wurden sie zuerst bei 1200 Grad Celsius ausgeglüht und dann immer im Exsiccator aufbewahrt.

Als Veraschungsofen benutzten wir einen Muffelofen der Fa. Hereus, der ein regulierbares Thermosstat mit Temperaturanzeige besaß und acht Schälchen mit Inhalt gleichzeitig aufnehmen konnte.

Entsprechend L a n g wählten wir als Veraschungstemperatur 720 Grad Celsius. Oberhalb dieser Temperatur können Substanzverluste auftreten, die das Ergebnis verändern. Zu beachten war weiterhin, daß bei Beginn der Veraschung die Temperatur nur langsam gesteigert wurde. Das Veraschungsgut bläht sich nämlich auf, wobei die entstandenen gasförmigen und öligen Destillationsprodukte entweichen. Bei zu raschem Erhitzen erfolgt die Verflüchtigung so stürmisch, daß - wie bereits ausgeführt - durch Mitreißen von Partikel Substanzverluste entstehen. Erst wenn die vollständige Verkohlung eingetreten ist, darf die Temperatur schneller gesteigert werden. Unsere Veraschungszeit betrug 4 Stunden.

2.6.5. Bestimmung des Kalksalzgehaltes der Knochenproben

2.6.5.1. direkt aus dem Aschegewicht

In der uns vorliegenden Literatur setzt man das bei der Veraschung entstehende Substrat gleich Kalksalz.

Daraus ergibt sich folgendes Meßverfahren: Man läßt die veraschten Knochenzylinder im Exsiccator abkühlen und wiegt dann das Schälchen mit der Asche. Von diesem Gewicht zieht

man das Gewicht des Leerschälchens ab und erhält somit das Aschegewicht, das dem Kalksalzgehalt der entsprechenden Knochenprobe entspricht.

Bezieht man diesen Wert auf das Volumen bzw. Frischgewicht, so bekommt man die gesuchten Konzentrationsangaben mgHA/ml Knochen oder mg HA/mg Knochen.

2.6.5.2. indirekt über die Kalziumkonzentration

Da in der Asche neben dem Kalksalz (= Hydroxylapatit) auch andere Moleküle und Elemente, wie z.B. die Oxide von Schwefel (aus schwefelhaltigen organischen Verbindungen), von Eisen (aus dem Blut und Knochenmark) und von anderen Schwer- bzw. Alkalimetallen, enthalten sind, wollten wir die Hypothese "Asche = Hydroxylapatit" nicht übernehmen. Um diese obengenannten Störfaktoren quantitativ zu erfassen bzw. auszuschalten, suchten wir eine Methode mit der man den "reinen" HA-Gehalt bestimmen konnte.

Dabei legten wir folgenden Gedanken zu Grunde: Da in einem Molekül die verschiedenen Atome in einem bekannten, konstanten Zahlen- oder Gewichtsverhältnis stehen, genügt es, die Menge eines Atomes zu finden, um die Menge der

ganzen Substanz zu errechnen. Das Kalzium-Atom ist das Schlüsselatom des Hydroxylapatits ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}, \text{F}$). Es steht in einem konstanten Verhältnis zum Phosphat (2.3. S.23) und zu den anderen Atomen und Molekülen in der Summenformel des HA. Indem man nun das Ca mißt, kann über das Verhältnis der Atomgewichte der am Molekülaufbau beteiligten Atome der Gehalt an HA errechnet werden. Die Ca-Bestimmung gelingt am einfachsten mittels Titration: das Kalzium wird als Oxalat gefällt und oxymetrisch titriert, entweder mit Permanganat oder mit Cer(IV)sulfat. Diese Art der Analyse hatte für unsere Untersuchungen den entscheidenden Nachteil, daß sie für eine längere Versuchsserie zu langwierig und aufwendig war.

Sehr gut geeignet erschien uns die Flammenphotometrie. Das Flammenphotometer¹ erfaßt selbst geringste Mengen des gesuchten Elementes und erlaubt gute reproduzierbare Versuchsbedingungen über einen längeren Zeitraum.

Zur Vorbereitung für die flammenphotometrische Messung mußte ein kleines Stück des Veraschungszyllinders in einem Mörser zerrieben werden. Von dem entstandenen

¹ Herrn Prof. Dr. Behrens (Dir. des I. anorganischen Instituts für Chemie), der uns ein Flammenphotometer der Fa. Eppendorf, eine Analysenwaage, einen Muffelofen und Arbeitsräume zur Verfügung stellte, gilt unser großer Dank.

Knochenmehl wurden 10 mg in ein Reagenzglas eingewogen und mit einem Gemisch aus H_2O und 1n HCL (8:2) gelöst. Die Zugabe von H-Ionen war erforderlich, da sich die Asche in reinem Wasser nicht ausreichend löste. Zur weiteren Verdünnung goß man den Reagenzglasinhalt in 100 ml Meßkolben und füllte mit Wasser bis zur Marke auf. Beim Lösen und Verdünnen verwendeten wir nur Aqua bidest., um den wassereigenen Ca-Anteil möglichst gering zu halten.

Neben dieser Meßlösung mußte eine Eichlösung hergestellt werden, die als Vergleichsgröße eine bekannte Ca-Konzentration mit einer Phosphatkonzentration enthielt, die zum Ca im gleichen Verhältnis steht wie im Knochen.

Nach mehreren Meßreihen stellten wir fest, daß der Eichlösung auch die gleiche Menge H-Ionen wie der Meßlösung beigelegt werden mußte, da die H-Ionen indirekt den Dampfdruck im Flammenphotometer erniedrigen und somit bei einseitiger Gabe das Ergebnis entsprechend verändern (S c h u h k n e c h t 1961).¹

Die jeweilige Verdünnung und die Konzentration der Eich- und Meßlösung hängt vom Proportionalitätsbereich

¹ Die zugesetzten H^+ -Ionen bilden mit den vorhandenen Phosphaten undissoziierte Phosphorsäure, die die Intensität der Ca-Emission in der Azetylen-Luft-Flamme infolge Verdampfungsblockierung stark erniedrigt.

des Flammenphotometers ab. Da nach S c h ü t t e (1963) in der Knochenasche 35-37 % Ca enthalten sind, setzten wir unsere Eichlösung mit einer Ca-Konzentration von 35 mgCa/1000 ml an.

Beim Meßvorgang wurden im direkten Vergleich Meßlösung und Eichlösung nacheinander photometriert. Um Meßfehler möglichst gering zu halten, wurde jede Meßreihe dreimal (an drei verschiedenen Tagen) ausgeführt.

3. Ergebnisse

Die in 54 Karteikarten gesammelten Einzelmeßdaten der Knochen wurden auf Lochkarten gestanzt. Alle unsere Ergebnisse wurden über EDV errechnet und statistisch ausgewertet.¹

3.1. Konzentrationsangaben

3.1.1. Erklärung der eingeführten Bezeichnungen und Abkürzungen

Mit einfachen Subtraktionen errechnet der Computer das Frisch- (=FG), Trocken (=TG), und

¹ Ich möchte mich recht herzlich bedanken bei Herrn Dipl.-Phys. Probst und Herrn Dipl.-Math. Seibold vom Institut für Medizinische Statistik und Dokumentation (Direktor: Prof. Dr. L. Horbach) für die tatkräftige Hilfe bei der Ausarbeitung der EDV-Programme.

Aschegewicht (=AG). Indem diese Werte zueinander in Beziehung gesetzt wurden, ergaben sich folgende Daten:

Das beim Trocknen der Knochenproben frei verdampfbare Wasser (110°C , 72 Std.) wird prozentual erfaßt, wenn man das Trockengewicht im Verhältnis zum Frischgewicht angibt ($100(1-\text{TG}/\text{FG})$). Dieser "H₂O-Wert" gibt den %ualen Wasseranteil des frischen Knochens an.

Unter "org." definieren wir das Verhältnis des Gewichtsverlustes zum Frischgewicht, der beim Veraschen (einschließlich Trocknen) auftritt ($100(1-\text{AG}/\text{FG})$). Dieser Wert enthält demnach diejenigen Anteile des Frischknochens, die aus organischer Substanz + Wasser bestehen. Der reine Prozentsatz der organischen Matrix errechnet sich durch Subtraktion des H₂O-Wertes vom org.-Wert. Mit dieser Definition des org.-Wertes kann man leicht den prozentualen Anteil der anorganischen Substanz (=Asche) feststellen ($100-\text{org.} = \text{anorgan.}$ Substanz), der sich aber auch über die Beziehung $100 \times \text{Aschegewicht}/\text{Frischgewicht}$ errechnen läßt. Dieser letzte Ausdruck entspricht der Definition für HAAG (siehe S. 39 unten), so daß die anorganischen Anteile der Knochenproben in unseren Tabellen auf S. 46 u. 47 unter der Rubrik HAAG abgelesen werden können.

Der mit dem Flammenphotometer gemessene C a G-Wert gibt die Kalziumteile in 100 Teilen Asche (= % Ca im untersuchten Knochen) an und entspricht der gewichtsbezogenen Konzentrationsangabe mg Ca/100 mg Asche. Er errechnet sich aus der Formel:

$$C a G = \text{EICHLÖSUNG} / \text{MESSLÖSUNG} \times A \times 100 / \text{EINWAAGE}$$
 in mg/mg wobei A ein empirisch gefundener Korrekturfaktor ist, der den Einfluß der HCl in der Meßlösung kompensiert (siehe S. 38).

Im gleichen Sinne bedeutet der C a V-Wert die Kalziumkonzentration, die sich auf das Volumen bezieht, d.h. mg Ca/100 ml Frischknochen. Daraus folgt:

$$C a V = C a G \times A G / 100 / \text{Volumen des Knochenzylinders}$$
 in mg/ml.

H A A V gibt den Hydroxylapatitgehalt der Probe bezogen auf das Volumen an. Da in der Literatur oft der HA-Gehalt mit dem Aschegehalt gleichgesetzt wurde, formulieren wir:

$$H A A V = \text{Aschegewicht} / \text{Volumen} \times 100$$
 in mg/100 ml.

Demgegenüber zeigt der H A A G-Wert den Kalksalzgehalt pro 100 mg Frischknochen an:

$$H A A G = 100 \times \text{Aschegewicht} / \text{Frischgewicht}$$
 in mg/100 mg.

Da wir die Gleichsetzung HA = Kalksalz = Asche nicht kritiklos übernehmen wollten (siehe S. 35 f), bestimm-

ten wir mit Hilfe der Summenformel des HA und der Ca-Konzentration die theoretische HA-Konzentration. Diese Angabe wurde wie auf S. 41 sowohl auf das Volumen als auch auf das Frischgewicht bezogen. Die Summenformel des HA lautet $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH},\text{F})$. Das Ca verhält sich dementsprechend zum HA wie 200,4 : 521,33 (aus den Atomgewichten der beteiligten Elemente errechnet). Daraus läßt sich ableiten: der theoretische HA in mg/ml Knochen entspricht dem Ca-Gehalt/Volumen multipliziert mit dem umgekehrten Verhältnis der Summe der Atomgewichte des HA:

$$\text{H A K V} = \text{CaV} \times 521,33/200,4 \text{ in mg/100 ml.}$$

Die gleiche Überlegung führte zum H A K G-Wert (= theoretischer HA-Wert) bezogen auf das Frischgewicht der Probe:

Hier lautet der Ansatz

$$\text{H A K G} = \text{CaG} \times 521,33/200,4 \times \text{AG/FG in mg/100mg.}$$

Zusätzlich wurden die Differenzen zwischen den direkten und den indirekten Konzentrationsangaben (HAAV-HAKV und HAAF-HAKG) gebildet, die man D i f f 1 bzw. D i f f 2 bezeichnete. Diese dienten dazu, die Größe der Unterschiede zu erfassen und eine eventuelle Gesetzmäßigkeit in den Differenzen der theoretischen und praktischen Werte zu erkennen.

Wir haben diese verschiedenen Konzentrationen eingeführt, weil wir für unsere Fragestellung mit den gängigen nicht völlig einverstanden waren und deshalb eine genauere Konzentrationsangabe für den HA finden wollten, die sich auf ein Meßverfahren zurückführen läßt, das Meßfehler weitgehend auszuschalten vermag.

3.1.2. Vergleich gewichts- zu volumenbezogener Konzentrationsangabe

Die Konzentrationsangabe mgHA/ml Knochen hat sich in der Praxis gut bewährt. Da aber bei den üblichen Volumenbestimmungen größere Fehlerquellen (siehe unten) auftreten, probierten wir ein meßtechnisch genaueres Bezugssystem (Gewicht) und verglichen beide Meßverfahren. Setzt man den maximalen relativen Fehler¹ als Vergleichskriterium, so ergibt sich für unseren Fall:

Die durchschnittliche Meßgröße bei der Volumenbestimmung betrug 1,0 ml. Wir nehmen bei sorgfältigem Ablesen einen maximalen Meßfehler von 0,05 ml an und erhalten so bei einer minimalen Meßgröße von 0,24 ml einen maximalen relativen Fehler von ca. 20 %.

¹ relativer Fehler = $\frac{\text{Fehler}}{\text{tatsächlicher Wert}}$ in %

Die Analysenwaage ermöglicht einen Meßfehler von 0,10 mg. Bei einem Minimalgewicht von 350 mg errechnet sich der maximale relative Fehler einer einmaligen Gewichtsbestimmung mit 0,03 %.

Da aber die Konzentrationsangaben auf mehreren Messungen beruhen, muß noch die Fehlerfortpflanzung berücksichtigt werden, und kommt zu folgenden Überlegungen:

Die HAAV- und die HAAG-Werte sind gegeben durch:

$$\begin{aligned}
 (1) \quad \text{HAAV} &= \frac{\text{Aschegewicht}}{\text{Volumen}} \quad \text{in } \frac{\text{mg}}{\text{ml}} \\
 &= \frac{\text{Schale mit Asche} - \text{Schale leer}}{\text{Volumen}} \\
 &= \frac{v(1) - v(2)}{v(3)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 (2) \quad \text{HAAG} &= \frac{\text{Aschegewicht}}{100 \text{ mg Frischgewicht}} \quad \text{in } \frac{\text{mg}}{\text{ml}} \\
 &= \frac{\text{Schale mit Asche} - \text{Schale leer}}{\text{Schale mit Frischknochen} - \text{Schale leer}} \cdot 100 \\
 &= \frac{v(1) - v(2)}{v(4) - v(2)} \cdot 10^2
 \end{aligned}$$

Zur Fehlerschätzung nehmen wir das vollständige Differential obiger Funktionen (Taylorreihe nach dem 1. Glied abgebrochen), d.h. die lineare Approximation.

Für beliebige Funktionen mit entsprechenden Differenzierbarkeitseigenschaften gilt:

$$f(x_1+x_1^A, x_2+x_2^A, + \dots x_n+x_n^A) - f(x_1, \dots x_n)$$

$$\sum_{i=1}^n \frac{\delta f}{\delta x_i} \cdot \Delta x_i$$

d.h. in unserem Fall

$$x_i = \begin{array}{l} \pm 0,03 \text{ mg bei Gewichtsbestimmungen} \\ \pm 0,05 \text{ ml bei Volumenbestimmungen} \end{array} \quad \text{Meßfehler}$$

ergibt sich folgende Formel für die Fehlerfortpflanzung:

$$(1) \quad \text{HAAV} = \frac{\delta \text{HAAV}}{\delta v(1)} \cdot \Delta v(1) + \frac{\delta \text{HAAV}}{\delta v(2)} \cdot \Delta v(2) + \frac{\delta \text{HAAV}}{\delta v(3)} \cdot \Delta v(3)$$

$$= \frac{\Delta v(1)}{v(2)} = \frac{\Delta v(2)}{v(3)} - \left(\frac{v(1) - v(2)}{v(3)} \right) \frac{\Delta v(3)}{v(3)}$$

$$(2) \quad \text{HAAG} = \frac{\delta \text{HAAG}}{\delta v(1)} \cdot \Delta v(1) + \frac{\delta \text{HAAG}}{\delta v(2)} \cdot \Delta v(2) + \frac{\delta \text{HAAG}}{\delta v(4)} \cdot \Delta v(4)$$

$$= \left(\frac{\Delta v(1)}{v(4)-v(2)} + \frac{(v(1)-v(4))}{(v(4)-v(2))^2} - \frac{v(1)-v(2)}{(v(4)-v(2))^2} \right. \\ \left. \cdot \Delta v(4) \right) 10^2$$

Die Auswertung über EDV ergab, daß der durch Fehlerfortpflanzung entstehende Fehler

für HAAV in der Größenordnung von 12 % und

für HAAG in der Größenordnung von 2 % liegt.

Wie somit zu ersehen ist, bleibt der in der Volumenbestimmung enthaltene hohe relative Meßfehler über die Fehlerfortpflanzung auch für den HAAV-Wert bestehen. Unsere volumenbezogenen Angaben dienen also hauptsächlich Vergleichszwecken.

Für die weiteren Überlegungen und Berechnungen stützen wir uns auf Konzentrationswerte, die sich auf das Gewicht beziehen.

3.1.3. Über die Kalziumkonzentration errechnete Kalksalzwerte

In zahlreichen Arbeiten betrachten die Autoren den Ascherückstand als Hydroxylapatit. Da in der Asche u. a. auch Zink, Eisen, Natrium, Kalium, Magnesium usw. zurückbleiben und den reinen Kalksalzwert verfälschen, galt es zu finden, inwieweit diese Elemente die HA-Konzentrationen verändern.

In der oben geschilderten Weise (S. 41 u. S. 42) errechneten wir über die Summenformel des Hydroxylapatits und die Kalziumkonzentration die Werte HAKG und HAKV.

Beim Prüfen der Einzelergebnisse und der Tabelle 3 erkennt man, daß die errechneten "theoretischen" Werte durchwegs kleiner sind

als die gemessenen. Die Differenzen (diff 1 bzw. 2) zwischen HAAG und HAKG bzw. HAAV und HAKV werden größer sobald die Konzentrationen zunehmen. Doch bleibt das Verhältnis der Werte zueinander relativ konstant:

Mittelt man die Quotienten HAAG/HAKG und HAAV/HAKV aller Einzelmessungen, so erhält man $\bar{x} = 1.0778$ (Standardabweichung $s = 0,004$) bzw. $\bar{x} = 1,0775$ ($s = 0,004$).

Drückt man die errechneten Konzentrationsangaben (HAKG, HAKV) in Prozent der "gemessenen" aus und schlüsselt nach den einzelnen Bohrstellen auf, ergibt sich Tabelle 4^{*}:

Man erkennt, daß sich Bohrstelle 1 deutlich von den drei anderen abhebt, das zeigt, daß im Femurkopf der errechnete HA-Wert besser mit dem Aschewert korreliert als z.B. im Oberschenkelhals.

Bohrstelle	1	2	3	4
HAKG				
in % von HAAG	93,65	91,90	92,19	92,42
HAKV				
in % von HAAV	93,65	91,89	92,41	91,95

Tab.: 4^{*} die theoretisch errechneten HA-Werte im Vergleich mit den HA-Werten, die sich aus dem Ascherückstand ergeben.

3.2. Ausklammern von fehlerhaften und unvollständigen Werten

Da laut Definition von 54 Knochen jeweils 4 Bohrstellen entnommen werden sollten, müßten in die Auswertung 216 Untersuchungsentnahmen eingehen.

Wir verfügen jedoch nur über 207 vollständig analysierte Bohrstellen. In zwei Fällen war der Oberschenkelhals so dünn, daß wir hier nur eine Bohrung vornehmen konnten. Wir bevorzugten dabei die Bohrstelle 3; es fehlt die 2. Bohrung in den Knochen Nr. 41 und 54.

Dreimal zerbrach ein Porzellanschälchen im Muffelofen. Die Asche lag zerstreut im Ofen, und ihr Gewicht konnte nicht mehr exakt bestimmt werden (Knochen Nr. 12, Bohrstelle 2 = 12/2; 33/4; 52/1).

Von vier Einzelproben liegen aus technischen Gründen keine Photometerwerte vor (1/3; 33/1; 40/1; 45/4). Da hier vorher das Aschegewicht bestimmt worden war, konnten aber Aussagen über H_2O , org., HAAV, HAAG gemacht werden.

Von diesen 207 vollständig untersuchten Knochenproben nahmen wir dann später nochmals 7 aus der Statistik, da hier bei den Bohrstellen 2 und 3 die Corticalis mitangebohrt wurde (2/3; 5/3;

10/2; 25/3; 50/3; 52/2) und damit die Ergebnisse durch den hohen Ca-Anteil der Corticalis verfälscht wurden.

Bei der Bohrstelle 34/1 war die Einwaage zu schwer, so daß der Proportionalitätsbereich des Flammenphotometers überschritten wurde. Doch konnten auch hier die H_2O -, org.-, HAAV-, HAAG-Werte verwendet werden.

	keine Ergebnisse	keine Aussagen über HAKV, HAKG
keine Bohrung	2	
Asche verschüttet	3	
keine Photometerwerte		4
Prop.-Bereich des Photometers überschritten		1
Corticalis angebohrt (aus der Statistik gen.)	6	
Fälle, die nicht in die Statistik eingehen	11	
Fälle, die teilweise in die Statistik eingehen		5

Tab. 1: Anzahl derjenigen Fälle, die nicht oder nur teilweise in die Statistik eingehen.
HAKV, HAKG = errechneter Hydroxylapatitgehalt bezogen auf das Gewicht bzw. Volumen des untersuchten Knochens.

Auf diese Weise verbleiben 200 bzw. 205 Meßstellen, deren Zahl sich wie folgt auf die einzelnen Bohrungen verteilt:

Bohrstelle 1	50 (53)	Fälle
Bohrstelle 2	49 (49)	"
Bohrstelle 3	49 (50)	"
Bohrstelle 4	52 (53)	"

Die Zahlen in Klammern bedeuten die Erweiterung der untersuchten Proben mit den Fällen ohne HAKG- und HAKV-Werten, bei denen aber alle anderen Daten gemessen waren und somit Aussagen über den "direkten" Kalksalzgehalt erlaubten.

Eliminiert man nun alle Knochen, die keine 4 vollständig analysierten Bohrstellen aufweisen, bleiben für die vergleichenden Betrachtungen 43 Knochen.

3.3. Einzelwerte aller untersuchten Stanzzyylinder

Für jede gebohrte Knochenprobe rechnete der Computer die Werte H_2O , org., CaG, CaV, HAAV, HAKV, HAAG, HAKG, Diff 1 und Diff 2 aus; gleichzeitig schrieb er diese Daten auf einen Ausdruck, der eine genaue Überprüfung erlaubte.

(Wegen des großen Umfangs ist der Ausdruck der Einzelwerte der Arbeit nicht beigelegt.)

3.4. Mittelwerte

Um statistische Aussagen machen zu können, faßten wir die Einzelergebnisse zu größeren Kollekt-

tiven zusammen. So bildeten wir einen Mittelwert über das jeweilige coxale Femurende, indem wir die vier einzelnen Bohrstellen primär gemeinsam betrachteten. Unser besonderes Interesse richtete sich auf die Mittelwerte über die vier charakteristischen Bohrstellen, wo wir signifikante Unterschiede erwarteten.

3.4.1. Mittelwerte über alle ausgewerteten Knochenzylinder

Zum Zwecke eines guten Überblickes und um eine globale Aussage über das coxale Femurende machen zu können, ließen wir den Rechner alle 200 untersuchten Bohrstellen der 54 Knochen addieren und über die einzelnen Rubriken die Mittelwerte bilden (Tab. 2a, 2b).

Wir erhalten Aussagen über die Zusammensetzung des proximalen Oberschenkels eines Patientenkollektivs, dessen Alter von 19 - 89 Jahre reicht, wobei aber die überwiegende Mehrheit in der Altersgruppe 60 - 75 Jahre liegt.

H ₂ O	24,84	% des Frischgewichtes
org	56,05	"
Asche	19,11	"
Kalzium	35,55	% des Aschegewichtes

Tab. 2a: Zusammensetzung des Knochens bei 54 untersuchten coxalen Femurenden

Daneben gewinnen wir die gemittelten Kalzium- und Kalksalzkonzentrationen dieses Knochenbereiches.

CaG	35,55	mg Ca/100 mg FG
HAAG	19,11	mg HA/100 mg FG
HAKG	17,73	"
CaV	81,89	mg Ca/ml Knochen
HAAV	229,56	mg HA/ml Knochen
HAKV	213,04	"

Tab. 2b: Kalzium- und Kalksalzkonzentrationen von 54 untersuchten coxalen Femurenden.
(Erklärung der Abkürzungen siehe Text S. 39 und 40 ff)

3.4.2. Mittelwerte der einzelnen coxalen Femurenden

Mittelt man die vier bzw. drei Bohrstellen der einzelnen Knochenstücke, so erhält man eine individuelle Aussage über das jeweilige coxale Femurende. Allerdings sind die Mittelwerte, die aus drei Einzelwerten gebildet wurden, mit Vorsicht zu betrachten, da nicht alle vier Bohrstellen annähernd gleich hohe Werte liefern (siehe S. 53). In der folgenden Tabelle 4 sind diese Knochen, die nur drei Bohrstellen haben, mit einem Kreuz gekennzeichnet.

3.4.3. Mittelwerte über die vier Bohrstellen

Hier werden die charakteristischen Bohrstellen (1 = aus der Druckaufnahmezone des Oberschenkelkopfes, 2 = aus dem oberen medialen Schenkelhals, 3 = aus dem lateralen unteren Schenkelhalsanteil, 4 = aus der Mitte der Linea intertrochanterica) gesondert betrachtet.

Die aus den Computerwerten erstellte Tabelle 3 demonstriert, daß sich die Spongiosa des Oberschenkelkopfes nicht nur qualitativ sondern auch quantitativ von der des Schenkelhalses unterscheidet. Die Zusammensetzung der Bohrstelle I weicht in ihrem Gehalt an Wasser, organischer und anorganischer Substanz deutlich von den anderen drei Bohrstellen ab. Darüberhinaus bedeutet der fast doppelt so hohe Ascheanteil der Bohrstelle I einen über zweimal so großen Kalksalzgehalt.

Bohrstelle	I	II	III	IV
H ₂ O	16,20	29,58	27,83	25,76 % d. FG
org	54,66	55,24	55,79	58,52 % d. FG
Asche	29,14	15,18	16,38	15,72 % d. FG
CaG	35,92	35,31	35,40	35,52 mgCa/100 mg Knochen
CaV	131,41	61,81	69,73	64,60 mgCa/ml Knochen
HAHV	365,02	174,83	195,65	182,77 mgHA/ml
HAKV	341,86	160,79	181,41	168,07 mgHA/ml
HAAG	29,14	15,18	16,38	15,72 mgHA/100 mg Knochen
HAKG	27,29	13,97	15,12	14,53 mgHA/100 mg Knochen

Tab. 3: Die gemittelten Daten der Bohrstellen 1 - 4.
 Erklärung der einzelnen Abkürzungen siehe
 Text (S. 39 u. S. 40 ff)

Nr.	H ₂ O	org.	CaG	CaV	HAAG	HAKV	Diff1	HAAG	HAKG	Diff2
1 +	19.99	80.33	36.05	80.39	221.58	209.13	12.45	19.01	17.92	1.08
2	24.06	82.20	34.62	65.76	190.08	171.06	19.01	17.80	16.04	1.76
3	24.81	85.59	36.75	64.26	175.31	167.16	8.15	14.41	13.77	0.64
4	46.62	82.13	35.97	62.82	173.95	163.42	10.53	17.82	16.73	1.09
5	27.51	81.37	35.52	69.42	195.10	180.59	14.51	18.63	17.24	1.39
6	20.64	79.59	36.08	75.48	207.29	196.36	10.93	20.41	19.35	1.07
7	11.26	38.35	34.50	42.31	123.61	111.64	11.97	11.64	10.49	1.15
8	14.06	83.13	36.17	64.47	177.28	167.71	9.57	16.81	15.85	0.96
9	19.37	87.84	35.58	44.12	123.58	114.78	8.80	12.16	11.28	0.88
10	23.23	76.55	36.75	82.48	224.55	214.56	9.99	23.50	22.47	1.03
11	26.31	85.35	36.25	51.33	141.60	135.00	6.60	14.05	13.37	0.68
12 +	7.79	86.87	36.72	76.44	208.10	198.76	9.34	19.13	18.28	0.86
13	30.77	81.11	35.90	71.45	197.66	185.87	11.79	18.89	17.75	1.14
14	12.79	84.35	36.34	54.67	150.13	142.22	7.91	15.95	15.11	0.84
15	10.68	78.25	36.54	38.60	242.16	230.43	11.63	21.74	20.68	1.05
16	57.16	84.53	34.54	56.80	162.37	147.76	14.61	15.47	14.07	1.40
17	15.40	84.67	36.20	59.50	166.48	154.78	11.70	15.33	14.26	1.07
18	21.12	81.59	34.14	70.47	201.43	183.32	18.17	13.41	16.63	1.72
19	35.16	77.32	35.17	86.53	244.71	225.09	19.62	22.68	20.84	1.84
20	13.77	81.52	35.33	63.16	191.66	179.67	11.99	18.48	17.32	1.16
21	21.71	86.14	35.70	71.51	200.89	186.04	14.85	19.86	18.40	1.47
22	25.41	74.11	35.94	107.83	293.38	280.51	13.37	25.33	24.29	1.61
23	33.00	83.56	35.56	65.47	183.95	170.31	13.64	16.44	15.22	1.22
24	23.58	80.23	36.51	81.73	223.77	212.63	11.15	19.77	18.79	0.99
25	40.09	77.91	35.19	88.32	250.86	229.77	21.09	22.09	20.23	1.86
26	29.85	80.44	34.50	78.12	225.53	203.21	22.32	13.56	17.65	1.91
27	23.09	86.55	34.90	59.68	170.87	155.24	15.62	13.50	12.26	1.24
28	13.80	80.33	34.64	75.25	216.76	195.77	20.99	19.07	17.21	1.86
29	33.70	86.20	35.27	43.95	237.82	218.40	19.42	13.80	18.18	1.62

Tab. 4: (Erläuterung nächste Seite)

Nr.	H ₂ O	org.	CAG	CaV	HAaV	HAKV	Diff1	HAAG	HAKG	Diff2
30	20.97	75.34	35.43	102.31	239.73	267.69	22.10	24.66	22.77	1.89
31	24.82	80.56	35.15	97.75	249.17	228.23	22.89	19.44	17.81	1.63
32	11.77	84.19	35.05	60.57	171.72	157.53	14.13	15.82	14.51	1.31
33	15.17	88.59	35.45	44.20	124.67	114.98	9.70	11.41	10.52	0.89
34	36.39	90.72	34.22	39.34	115.32	102.35	12.97	9.28	8.26	1.02
35	32.94	83.15	34.94	68.23	135.48	177.51	17.37	16.85	15.30	1.55
36	13.83	86.77	35.25	75.02	110.67	195.16	15.51	17.93	16.60	1.33
37	56.18	76.14	35.25	116.94	332.14	304.23	27.89	23.90	21.90	2.01
38	9.55	79.95	35.16	86.12	242.44	224.34	18.41	20.05	18.54	1.51
39	30.59	77.54	33.31	55.74	279.53	249.36	30.44	22.50	13.98	2.52
40	24.35	80.67	34.37	83.27	242.17	216.64	25.54	19.33	17.29	2.04
41	26.27	84.67	34.38	79.52	227.39	206.87	20.52	15.33	13.94	1.38
42	21.44	71.43	35.45	134.49	379.72	349.87	29.85	28.52	26.29	2.23
43	24.67	76.74	35.26	114.09	324.18	296.79	27.39	23.26	21.30	1.96
44	21.70	77.54	35.35	103.17	305.44	231.39	24.04	22.46	20.71	1.76
45	11.76	72.84	35.11	139.97	398.19	364.12	34.07	27.16	24.82	2.33
46	34.69	83.45	35.87	95.12	262.72	247.44	15.28	16.54	15.57	0.98
47	28.10	81.76	36.18	105.35	290.39	275.38	15.02	18.24	17.29	0.96
48	26.20	81.35	36.36	98.42	265.71	256.02	9.63	13.64	17.96	0.63
49	23.48	83.05	35.70	100.91	280.30	262.24	18.06	16.94	15.87	1.07
50	22.79	78.33	35.42	109.62	308.48	285.17	23.31	21.12	19.52	1.61
51	35.03	79.17	35.83	92.55	256.57	240.75	15.82	20.83	19.54	1.29
52	27.10	77.97	35.32	93.13	275.62	257.38	17.74	22.03	20.59	1.44
53	14.96	75.79	37.24	112.75	301.60	293.31	8.29	24.21	23.52	0.69
54	23.30	72.29	35.75	130.27	361.39	338.93	22.49	27.71	25.99	1.72

Tab. 4: (Fortsetzung) Computerausdruck der Mittelwerte der untersuchten 54 Knochen.

Diejenigen Knochen, die nur 3 Bohrstellen haben, sind mit einem + gekennzeichnet.
Erklärung der Abkürzungen H₂O, org., usw. siehe 3.1.1.

3.5. Die Zusammensetzung der Spongiosa an verschiedenen Stellen des coxalen Femurendes (Wasser - organische - anorganische Substanz)

Wie aus der Betrachtung der Tabelle 3 ersichtlich, hebt sich die Bohrstelle I in ihrer Zusammensetzung signifikant von den übrigen ab. Ihr erhöhter Anteil an anorganischer Substanz (29,14 % des Knochenfrischgewichtes) ist mit einem kleineren Wassergehalt (16,20 %) verbunden, während die organische Substanz in allen vier Bohrstellen annähernd gleiche Werte (ca. 55 %) aufweist.

Die Bohrstellen II, III und IV ähneln sich stark in ihren Werten, die man abgerundet wie folgt zusammenfassen kann: 28 % Wasser, 56 % organische und 16 % anorganische Substanz.

Auffallend erscheint bei Bohrstelle IV (25,76 %, Übergang Femurschaft in -hals) die Abnahme des H_2O -Gehaltes zugunsten des organischen Anteiles (58,72 %).

3.5.1. Die Zusammensetzung des Knochens an den
verschiedenen Bohrstellen in Abhängigkeit
vom Alter

Schlüsselt man die Werte der Tabelle 3 in
drei Altersgruppen auf (19 - 49 Jahre =
Zeit vollster Aktivität, 50 - 65 Jahre =
präsenile Phase, älter als 66 Jahre (- 81 J.)
= Senium), erhält man als Ergebnis Tabelle 5.
(Siehe auch Abb. 10 und 11).

Man erkennt, daß sich die Zusammensetzung
der Spongiosa des coxalen Femurendes mit zu-
nehmenden Alter verändert, wobei die größten
Veränderungen zwischen den Altersgruppen 19 -
49 und 50 - 65 Jahre sichtbar sind.

Besonders deutlich fällt die Abnahme des
Aschegehaltes der Bohrstelle I (Caput femoris)
auf, der von 37,26 % des Frischgewichtes
(19 - 49 J.) über 29,69 (50 - 65 J.) auf 26,15 %
im Senium absinkt, was einer Verminderung des
Aschegehaltes um 30 % entspricht.

Bohrstelle

	I	II	III	IV
H ₂ O	20,27	37,60	39,25	31,63
A org	42,47	42,68	42,02	48,54
Asche	37,26	19,72	18,73	19,83
H ₂ O	15,65	26,62	25,77	24,50
B org	54,66	59,06	59,55	59,82
Asche	29,69	14,52	14,68	15,78
H ₂ O	15,37	28,74	26,56	25,20
C org	58,49	56,55	57,16	59,49
Asche	26,25	14,71	16,28	15,31

Tab. 5: Die Zusammensetzung der Bohrstellen I, II, III und IV aus H₂O, organischer Substanz und Asche in Abhängigkeit vom Alter (A = 19 - 49 Jahre, B = 50 - 65 Jahre, C = älter als 66 Jahre).

Weniger ausgeprägt nimmt der Ascheanteil in den Bohrstellen II, III und IV (Collum femoris) ab, die bei unseren Untersuchungen annähernd gleiche Ergebnisse bieten. Von den Ausgangswerten 19,72

bzw. 18,73 bzw. 19,83 Ascheteile/100 Frischgewichts-
teile sinken sie auf die Werte 14,72 bzw. 16,18 bzw.
15,31, d.h. in den Bohrstellen des Oberschenkelhalses
vermindert sich der Aschegehalt um durchschnittlich
19 %.

Als auffallend erkennt man, daß diese Abnahme nicht
kontinuierlich wie in Bohrstelle I erfolgt, denn die
Altersgruppe 50-65 Jahre zeigt die gleichen niedrigen
Werte wie die ältere.

Der W a s s e r g e h a l t sinkt am stärksten von
der Altersgruppe 19-49 zur Gruppe 50-65 Jahre ab: die
Abnahme erreicht bei Bohrstelle III mit 35 % ihren
höchsten und bei Bohrstelle I mit 25 % ihren niedrigs-
ten Wert. In unseren Ergebnissen erkennen wir für das
Senium keine weitere Abnahme des H_2O -Gehaltes, im Ge-
genteil sogar eine leichte Zunahme um durchschnittlich
4,6 % bei den Bohrstellen II, III und IV.

Im Gegensatz zum Asche- und Wassergehalt steigt der
Anteil der o r g a n i s c h e n S u b s t a n z
an. Es errechnete sich eine mittlere Zunahme von 40 %,
wobei sich die einzelnen Bohrstellen leicht unter-
schieden. Die organischen Anteile der Bohrstelle I
nehmen für die Altersgruppe 50-65 Jahre zunächst um
30 % zu, um in späteren Jahren nochmals um 8 % zu

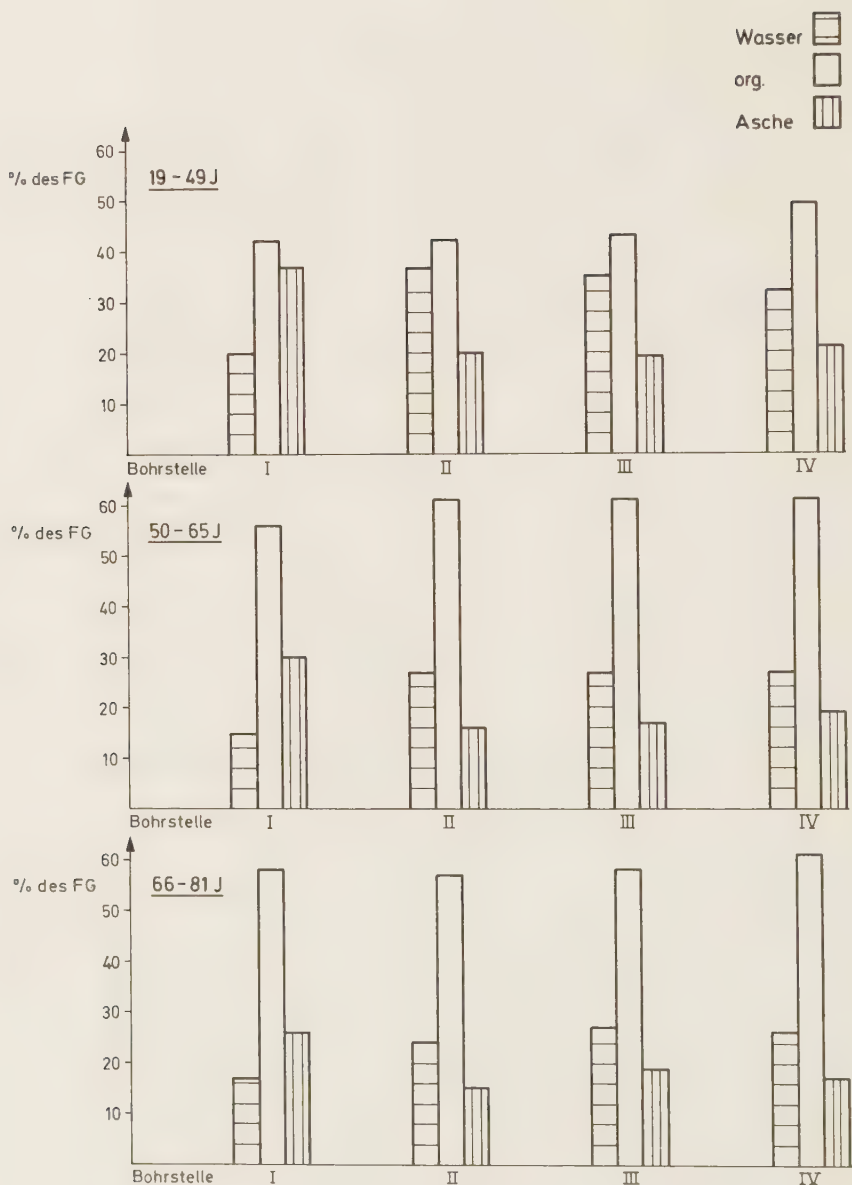


Abb. 10: Die Zusammensetzung der Spongiosa an vier verschiedenen Stellen des coxalen Femures in Abhängigkeit vom Alter. Die Werte für Wasser, org. Substanz und Asche sind in % des Knochenfrischgewichts angegeben.

steigen. Die anderen Bohrstellen erreichen ihre höchsten org.-Werte im Alter von 50-65 Jahren. Bei den Bohrstellen II und III glaubt man ein leichtes Absinken der organischen Substanz (ca. 5 %) für das Alter über 66 Jahre zu erkennen, das mit einem entsprechenden Anstieg des Wassergehalts (siehe S. 60) verbunden ist.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß die Bohrstelle I (Spongiosa des Oberschenkelkopfes) nicht nur in ihrer Zusammensetzung, sondern auch beim Alterungsprozeß andere Werte aufweist als die Bohrstellen aus dem Schenkelhalsbereich. Während die Spongiosa des Caput femoris mehr oder minder proportional dem Alter eine Abnahme des Asche- und Wassergehaltes mit einer Zunahme der organischen Substanz aufweist, zeigen die Bohrstellen II, III und IV ihre größten bzw. niedrigsten Werte in der Altersgruppe 50-65 Jahre, um in späteren Jahren nochmals, gegensinnig zur ersten Veränderung der Werte, zu steigen oder zu fallen.

3.6. Der Kalziumgehalt der veraschten Knochenproben

Das Ergebnis aus Tabelle 6 beweist, daß der Kalziumgehalt aus Spongiosaproben des coxalen Femur-endes unabhängig von der Bohrstelle und dem Alter

sehr konstant um den Mittelwert von 35,5 Kalziumteile/100 Ascheteile (= 35,5 mg Ca/100 mg Asche) schwankt.

Gering, jedoch nicht deutlich signifikant, erhöht scheinen die Werte der Bohrstelle I (besonders in der Altersgruppe über 66 Jahre mit 36,12 %, was einer Abweichung vom Mittelwert der übrigen Bohrstellen (35,39 %) von 2,0 % entspricht). Weiterhin läßt sich feststellen, daß die Kalziumwerte der Bohrung I innerhalb der einzelnen Knochen fast immer um ca. 1 % höher lagen als die Werte der restlichen Bohrungen.

Altersgruppe	Bohrstelle			
	I	II	III	IV
19-49 Jahre	35,69	35,26	35,36	35,42
50-65 Jahre	35,94	35,24	35,53	35,71
66-81 Jahre	36,12	35,38	35,31	35,39

Tab. 6: Der Kalziumgehalt in % der Knochenasche, eingeteilt in 3 Altersgruppen.

Bemerkenswerterweise steigt der Kalziumgehalt der Bohrstelle I im Alter leicht an (um 1,2 %).

3.7. Der Kalksalzgehalt an verschiedenen Stellen des coxalen Femurendes

Wie der erhöhte Ascheanteil der Bohrstelle I vermuten läßt, hat die Spongiosa des Oberschenkelkopfes entsprechend größere Kalksalzwerte als die Spongiosa des Halsbereichs: 365,02 mg Hydroxylapatit/ml Knochen bedeuten eine annähernd doppelt so hohe Kalksalzkonzentration als 182,77 mg HA/ml der Bohrstelle IV (= 99,7 %). Innerhalb des Schenkelhalsbereichs zeigt die Bohrstelle III die kleinsten Werte: Ihre 155,79 mg HA/ml liegen um 12,1 % unter dem Ergebnis von Bohrstelle II (174,65 mg HA/ml) und um 17,3 % unter dem der Bohrstelle IV (182,77 mg HA/ml).

Bei den gewichtsbezogenen Konzentrationsangaben sind die Unterschiede im allgemeinen weniger deutlich ausgeprägt (siehe Abb. 11). So beträgt die Differenz zwischen Bohrstelle I und IV nur 85,4 % (29,14 mg% HA - 15,72 mg% HA). Die Bohrstelle II (15,74 mg% HA) ist um 12,0 % größer als Bohrstelle III (13,85 mg% HA) und ebenso groß wie Bohrstelle IV (15,72 mg% HA).

Bohrstelle	I	II	III	IV
HAAV	365,02	174,65	155,79	182,77
HAKV	341,86	160,79	151,41	168,07
				mgHA/ml
HAAG	29,14	15,74	13,85	15,72
HAKG	27,29	14,51	12,78	14,53
				mg% HA

Tab. 7: Die Kalksalzkonzentration an vier verschiedenen Stellen des coxalen Femurendes.
Erklärung der Abkürzungen siehe 3.1.1.

Um auszuschließen, daß die über EDV errechneten, unterschiedlichen Mittelwerte der einzelnen Bohrstellen rein zufälliger Natur sind, werden die Ergebnisse mit einer entsprechenden statistischen Methode, dem sog. Friedman-Test (S i e g e l , 1956), überprüft.

Dabei gewichtet man die Kalksalzwerte eines Knochens (in mg HA/100 mg) abhängig von ihrer Größe mit den Rangzahlen 4, 3, 2, 1, d.h. die Bohrstelle mit dem höchsten HAAG-Wert im Knochen bekommt Rang 4, die zweithöchste Rang 3 usw. Schließlich werden diese Rangzahlen über jede Bohrstelle addiert, und man erhält folgende Rangsummen bei 38 ausgewählten Knochen¹:

Bohrstelle	I	II	III	IV
Rangsumme	152	80	67	81

Unter Annahme der Nullhypothese² bekommen wir nach
S i e g e l eine χ^2 -verteilte Testgröße V, wobei

$$V = \frac{12}{N \cdot k \cdot (k+1)} \sum_{j=1}^k (R_j)^2 - 3N \cdot (k+1) = 70,0$$

N = Anzahl der Knochen

k = Anzahl der Bohrstellen

R_j = Rangsumme der j-ten Bohrstelle

Die zugehörigen Signifikanzschranken (5 %, 1 %, 0,1 %) betragen:

$$\chi^3_{0,05} = 7,82; \chi^3_{0,01} = 11,34; \chi^3_{0,001} = 16,27$$

Man erkennt, daß der Wert der Testgröße V (= 70,0) weit über dem Wert der Signifikanzschranke 0,1 % (= 16,27) liegt, d.h. die Wahrscheinlichkeit den Wert 70,0 zu erhalten ist kleiner als 0,1 %. Somit trifft die Nullhypothese nicht zu und man kann daraus folgern, daß sich die Kalksalzwerte der vier Bohrstellen signifikant unterscheiden.

¹ Von den ursprünglich 54 bearbeiteten Knochen wurden diejenigen ausgeklammert, bei denen nur 3 Zylinder ausgebohrt werden konnten und jene, bei denen die Compacta mitangebohrt war.

² D.h. man nimmt zunächst an, daß keine Unterschiede zwischen den Bohrstellen vorhanden sind und will dies beweisen. Indem der Beweis mißlingt, folgert man, daß sich die Bohrstellen signifikant unterscheiden.

Auffallend hoch erscheint der Kalksalzwert der Bohrstelle III (16,38 mg HA/100 mg Knochen) in Relation zur entsprechenden Rangsumme. Während die HA-Konzentration der Bohrstelle III innerhalb des Schenkelhalsbereichs die höchsten Werte einnimmt (Tab. 7), steht sie in Bezug auf die Rangsumme deutlich an letzter Stelle.

Diese Tatsache mag einmal daran liegen, daß die Ergebnisse der Tabelle 7 die Mittelwerte der gemessenen Proben wiedergeben und die Rangsumme aus ausgewählten Knochen errechnet wurde. Zum anderen bleiben bei der Rangermittlung größere Konzentrationsunterschiede unberücksichtigt, da nicht der Absolutwert sondern der Rang zählt.

3.7.1. Der Kalksalzgehalt an verschiedenen Stellen des coxalen Femurendes in Abhängigkeit vom Geschlecht.

Bei unseren Untersuchungen stellten wir fest, daß die männlichen Oberschenkelknochen grundsätzlich kräftiger, schwerer und größer waren, als die weiblichen. Deshalb fragte man sich, ob diese äußerlich gut sichtbare Zunahme der Knochensubstanz bei den Männern auch mit einer größeren Knochendichte im Inneren, d.h. einem

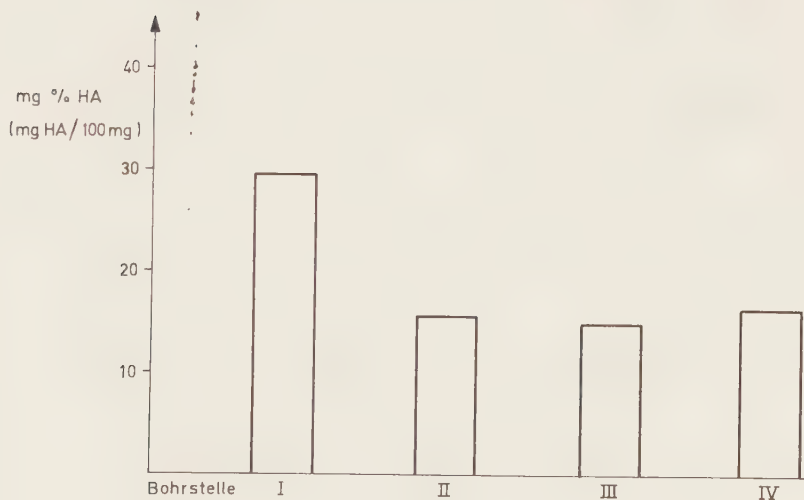
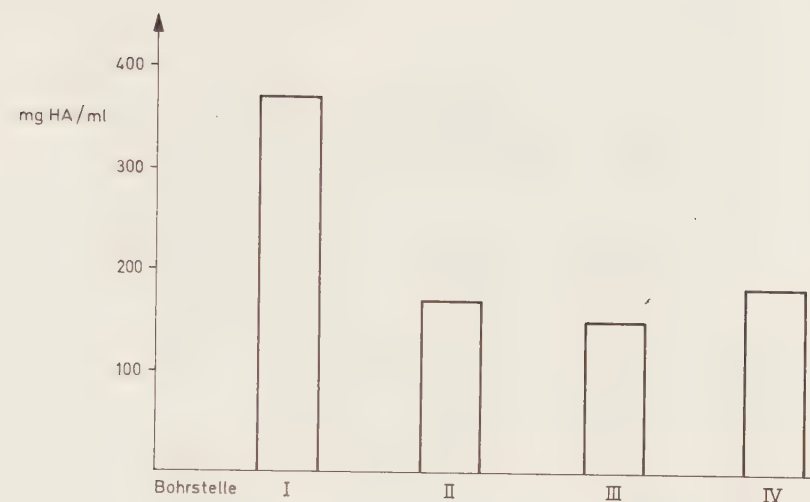


Abb. 11: Der Hydroxylapatitgehalt (HA) an vier defizienten Stellen des coxalen Femurendes.

Vergleich der volumen- (oben) und der gewichtsbezogenen Konzentrationsangaben (unten).

gegenüber den Frauen erhöhten Kalksalzwert verbunden ist.

Um gleichgroße Versuchsgruppen zu haben, beschränkten wir unsere Überlegungen auf die Jahrgänge über 50, da wir nur einen Knochen einer Frau unter 50 Jahren untersuchen konnten.

So ergab sich ein männliches Kollektiv (Durchschnittsalter 67 Jahre) mit 20 und ein weibliches (Durchschnittsalter 65,3 Jahre) mit 17 Fällen.

Die Ergebnisse gibt Tabelle 8 wieder:

Bohrstelle	I	II	III	IV	$\bar{x}$
HAAG in mgHA/100 mg Männer 50 J	27,89	14,67	12,83	15,92	17,83
HAAG in mgHA/100 mg Frauen 50 J	27,47	15,91	13,64	13,79	17,70

Tab. 8: Der Kalksalzgehalt der 4 Bohrstellen in mgHydroxylapatit/100mg Knochen für Frauen bzw. Männer über 50 Jahre.
x = Mittelwert der 4 Bohrstellen.

Die Untersuchungen zeigen für die Altersgruppe über 50 Jahre keinen signifikanten Unterschied im Kalksalzgehalt der Geschlechter. Die Hydroxylapatitkon-

zentration im coxalen Femurende der Frauen (17,70 mg% HA = Mittelwert der vier Bohrstellen) ist um 0,9 % kleiner als die der Männer (17,83 mg% HA), was keine echte Verminderung im Sinne der Signifikanz bedeutet.

Allerdings fällt ein Unterschied in der Rangfolge bei den Bohrstellen des Schenkelhalses auf. Während die Werte der Männer ihre zweithöchste Konzentration in der Bohrstelle IV haben, liegt diese bei den Frauen in der Bohrung II.

Stark erniedrigt gegenüber dem errechneten HAAG-Wert der Bohrstelle III (16,38 mg% HA) aus Tab. 7 erscheinen die entsprechenden Werte für die beiden Geschlechter aus Tab. 8 (12,83 bzw. 13,64 mg% HA). Der Grund für diese kleineren Konzentrationen liegt einmal im Wegfall der jüngeren Jahrgänge. Dadurch daß bei den Werten der Tabelle 8 nur diejenigen Knochen berücksichtigt wurden, bei denen alle vier Bohrstellen analysiert wurden und mit Sicherheit bei keiner die Kortikalis angebohrt war, erklärt andererseits auch die niedrigere Kalksalzkonzentration der Bohrstelle III gegenüber den Werten aus der Tab. 7, die aus einem größeren Kollektiv ermittelt wurden, das ev. Proben enthielt mit kleinsten Kortikalisanteilen, die wiederum eine höhere Kalksalzkonzentration der Spongiosa vortäuschen.

3.7.2. Der Kalksalzgehalt an verschiedenen Stellen des coxalen Femurendes in Abhängigkeit von der Krankenhausaufenthaltsdauer (KAD).

Werden lebende Knochen über einen längeren Zeitraum nicht oder nur wenig belastet, so wird in ihnen Knochensubstanz abgebaut, was mit dem Begriff Inaktivitätsosteoporose beschrieben wird (E i c h l e r 1970, K r o k o w s k i 1975).

Bei einem längeren Krankenzustand fehlt durch die horizontale Lage der ständige Gewichtsimpuls auf das coxale Femurende. Es müßten also bei Patienten mit einer längeren Bettlägrigkeit - der obigen Überlegung folgend - niedrigere Kalksalzwerte erwartet werden, als bei solchen, die relativ plötzlich verstorben sind.

Da wir über die eigentliche Bettenverweildauer keine Angaben erheben konnten, setzten wir als Parameter die Krankenhausaufenthaltsdauer prae morte ein, die allerdings keine Aussagen über eine totale oder bedingte Bettlägrigkeit macht.

Aus statistischen Gründen bildeten wir zwei Gruppen mit einer Krankenhausaufenthaltsdauer bis 3 Wochen bzw. länger als 3 Wochen.

Da bei unserem Untersuchungsgut die größten altersabhängigen Kalksalzveränderungen vor dem 50. Lebensjahr auftreten (siehe 3.5.1., 3.7.3.), beschränkten wir uns auf die Werte der Altersgruppe über 50 Jahre, um den "Störeffekt" des Alters möglichst klein zu halten.

Wir prüfen 37 Knochen, wobei 12 von Patienten stammen, die länger als 3 Wochen vor ihrem Tod im Krankenhaus lagen.

Bohrstelle	I	II	III	IV	$\bar{x}$
KAD 3 Wo HAAG in mg%	26,62	14,67	13,24	14,67	17,30
KAD 3 Wo HAAG in mg%	28,21	14,51	13,68	15,07	17,86

Tab. 9: Der Kalksalzgehalt an vier verschiedenen Stellen des coxalen Femurendes in Abhängigkeit von der Krankenhausaufenthaltsdauer (KAD).
 HAAG = Hydroxylapatitkonzentration in mg/
 100 mg Knochen
 $\bar{x}$ = Mittelwert über die 4 Bohrstellen

Unsere in Tab. 9 zusammengefaßten Ergebnisse zeigen, daß der Kalksalzgehalt im coxalen Femurende unserer Untersuchten bei einer Krankenhausaufenthaltsdauer von länger als 3 Wochen nur gering gegenüber abnimmt ($\bar{x}$ sinkt von 17,86 auf 17,30 mg% HA um 3,14 %). Während die Bohrstelle II in unseren Ergebnissen so-

gar eine leichte Zunahme des Hydroxylapatitgehaltes (1,1 %), ist bei Bohrstelle III und IV eine Abnahme um 3,22 % bzw. 2,65 % zu bemerken.

Deutlich hebt sich wieder Bohrstelle I von den anderen ab. Ihre mittlere Abnahme des Kalksalzgehaltes bei einer Krankenhausaufenthaltsdauer über 3 Wochen beträgt 5,64 %, was eine signifikante Verminderung bedeutet.

3.7.3. Der Kalksalzgehalt an verschiedenen Stellen des coxalen Femurendes in Abhängigkeit vom Alter.

Es ist aus vielen Untersuchungen bekannt, daß die Knochenspongiosa mit zunehmendem Alter abnimmt (W a g n e r 1965, U e h l i n g e r 1974, D e m m l e r 1975 u.v.a.). Wir untersuchten die Frage, in welchem quantitativen Ausmaß diese senile Osteoporose das coxale Femurende betrifft und ob Unterschiede in Bezug auf die Lokalisation der Bohrstellen zu erkennen sind.

Aus den oben genannten Gründen (siehe 3.5.1.) teilten wir die Werte in drei Altersgruppen ein:

Gruppe I	= 19 - 49 Jahre (6 Fälle)
Gruppe II	= 50 - 65 Jahre (18 Fälle)
Gruppe III	= 66 - 81 Jahre (19 Fälle)

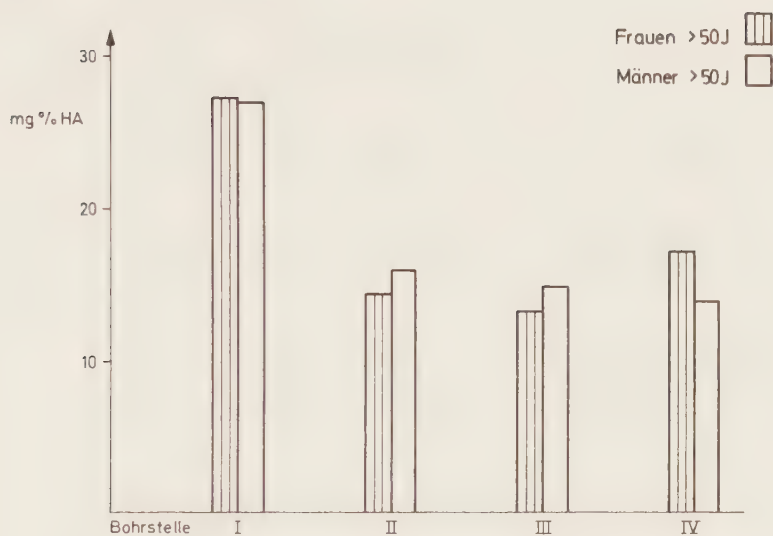


Abb. 12: Der Kalksalzgehalt (in mg% HA) an 4 verschiedenen Stellen des coxalen Femurendes in Abhängigkeit vom Geschlecht (für die Jahrgänge älter als 50 Jahre).

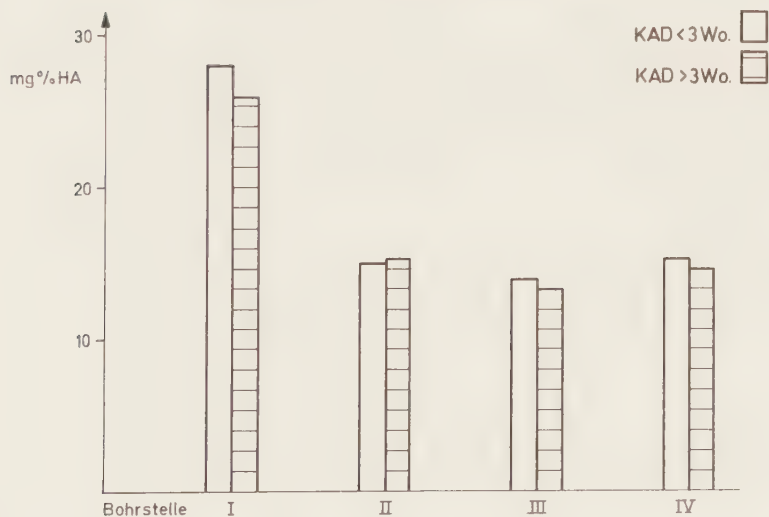


Abb. 13: Der Kalksalzgehalt an 4 verschiedenen Stellen des coxalen Femurendes (in mg% HA) in Abhängigkeit von der Krankenhausaufenthaltsdauer (KAD).

Bohrstelle	I	II	III	IV	$\bar{x}$
19-49 Jahre HAAG in mg%	37,17	19,87	18,73	19,57	23,85
50-65 Jahre HAAG in mg%	29,27	14,55	13,96	16,04	18,46
66-81 Jahre HAAG in mg%	26,20	14,57	13,18	13,99	16,99

Tab. 10: Der Kalksalzgehalt an verschiedenen Stellen des coxalen Femurendes in Abhängigkeit vom Alter.

HAAG = Hydroxylapatit in mg/100 mg Knochen

x = Mittelwert über die 4 Bohrstellen.

Der Kalksalzgehalt am coxalen Femurende (Mittelwerte $\bar{x}$) nimmt mit zunehmendem Alter stark ab: Gegenüber der Altersgruppe 19 - 49 Jahre (23,85 mg%HA) beträgt die mittlere HA-Konzentration im Alter über 66 Jahre 16,99 mg%, was eine Verminderung um 28,76 % bedeutet. Bemerkenswert ist, daß allgemein die größte Abnahme des Kalksalzgehaltes zwischen den Gruppen 19 - 49 Jahre und 50 - 65 Jahre stattfindet. Hier sinkt der HA-Wert um durchschnittlich 22,60 %, während er beim Übergang zur älteren Altersgruppe nur um 6,16 % abnimmt.

Betrachtet man die einzelnen Bohrstellen, erkennt man ein deutlich differentes Verhalten.

Bohrstelle I und besonders IV nehmen in ihren Kalksalzwerten mit ziemlicher Konstanz ab (siehe Tab. 10): Die HA-Konzentration der Bohrstelle I sinkt mit zunehmendem Alter um 29,51 %, wobei zwischen den Altersstufen die prozentualen Abnahmen 21,25 und 8,26 % betragen.

Am ausgeprägtesten sinkt der HA-Wert der Bohrstelle IV von 23,85 über 16,04 auf 13,99 mg%HA, was einer jeweiligen Verminderung von 18,04 bzw. 15,59 % und zusammen 33,64 % entspricht.

Gänzlich anders, in sich aber annähernd gleichsinig verhalten sich die Bohrstellen II und III. Von der Altersgruppe 19 - 49 zur Gruppe 50 - 65 Jahre macht die Bohrstelle II den größten Sprung: Ihr Kalksalzgehalt nimmt von 19,87 auf 14,55 mg%HA um 26,77 % ab. Für die älteren Jahrgänge zeigen unsere Ergebnisse keine weitere Abnahme.

Ähnlich deutlich sinkt der Kalksalzgehalt der Bohrstelle III zwischen der 1. und 2. Altersgruppe von 18,73 auf 13,96 mg%HA um 25,47 %, um aber dann später, im Alter über 66 Jahre nochmals um 4,16 % (13,18 mg%HA) kleiner zu werden.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß die Spongiosa des coxalen Femurendes keine einheitliche Abnahme ihres Kalksalzgehaltes während des Alterungsprozesses zeigt. Es treten typische lokalisierbare Unterschiede auf. So ist der HA-Wert der Schenkelhalsspongiosa in der Altersgruppe 50 - 65 Jahre gegenüber jüngeren Jahrgängen stark erniedrigt und sinkt bei älteren Jahrgängen nicht wesentlich weiter ab.

Die Kalksalzkonzentration der Spongiosa aus dem Oberschenkelkopf nimmt nicht so rasch aber kontinuierlicher ab als die aus dem -halsbereich. Besonders eindrucksvoll verringert sich die HA-Konzentration der Spongiosa am Übergang Schenkelhals - Schenkeldiaphyse.

3.7.4. Der Kalksalzgehalt an verschiedenen Stellen des coxalen Femurendes in Abhängigkeit vom Caput-Collum-Diaphysen-(CCD-)Winkel.

Nach den biomechanischen Grundsätzen von R o u x (siehe oben) bedingt eine veränderte Statik eine andere Konstruktion. In unsere Fragestellung übertragen würde das bedeuten: Sind unterschiedliche Caput-Collum-Diaphysen-(CCD-)Winkel mit unterschiedlichen Spannungs-

linien verbunden (P a u w e l s 1965), die besonders die Zug- und Druckbündel in ihrem Verlauf im Schenkelhals beeinflussen (Abb. 14) ?



Abb. 14: Röntgenbilder von coxalen Femurenden Erwachsener mit unterschiedlichen CCD-Winkeln.
Auffallend der differente Verlauf der Spongiosazüge (links: CCD-Winkel = 151 Grad, rechts: CCD-Winkel = 111 Grad).

Unsere Bohrstellen sind unabhängig vom CCD-Winkel definierte Punkte. Da dieser Winkel an einer bestimmten Stelle eine verschieden dichte Spongiosa bedingt, ist zu erwarten, daß der Kalksalzgehalt an den verschiedenen Bohrstellen des coxalen Femurendes (be-

sonders im Schenkelhalsbereich) mit diesem Winkel korreliert ist.

Der physiologische CCD-Winkel soll im ersten Lebensjahr 145° betragen und in der weiteren Entwicklung an Größe abnehmen. Im Erwachsenenalter soll er durchschnittlich 126° , im Greisenalter 120° Grad und darunter messen (L a n z/W a c h s m u t h 1972). Diese Werte sind einer großen physiologischen Streubreite unterworfen, wie auch unsere eigenen Untersuchungen ergaben, die für die Altersgruppe von 50 - 65 Jahre einen durchschnittlichen CCD-Winkel von 127° und für die Gruppe über 66 Jahre einen von 123° ermittelten.

Da bei unseren Patienten der Jahrgänge über 50 Jahre das Alter nicht mehr den großen Einfluß ausübt wie in den jüngeren (3.7.3.), versuchten wir den Kalksalzgehalt an den Bohrstellen II, III und IV (Bohrstelle I ist u. E. von den obigen Überlegungen weniger betroffen) unabhängig vom Alter bestimmten CCD-Winkeln zuzuordnen.

Wir setzten die errechneten Mittelwerte als Grenzpunkte und bildeten drei Klassen:

1. Knochen mit einem CCD-Winkel kleiner 123° (17 Fälle)
2. Knochen mit einem CCD-Winkel größer 127° (7 Fälle)
3. Knochen, die im Bereich zwischen 123° und 127° einschließlich liegen (13 Fälle).

Bohrstelle			
CCD-Winkel	II	III	IV
unberück- sichtigt	14,56	13,57	15,30 mg% HA
kleiner 123°	14,50	13,95	14,77 mg% HA
größer 127°	13,78	12,18	13,82 mg% HA
zwischen 123° u. 127°	15,05	13,73	15,77 mg% HA

Tab. 11: Der Kalksalzgehalt der Bohrstellen II, III und IV von Patienten über 50 Jahren in Abhängigkeit vom Caput-Collum-Diaphysen-(CCD-)Winkel.

Trotz der großen Streuung unserer Einzelwerte kann man aus den Ergebnissen der Tab. 11 gewisse Rückschlüsse ziehen, die vorsichtig interpretiert werden müssen, da eine deutliche Signifikanz der Unterschiede fehlt.

An den von uns definierten Bohrstellen bleibt unabhängig vom CCD-Winkel eine bestimmte Rangfolge für die Kalksalzkonzentration erhalten, indem Bohr-

stelle IV die höchsten, Bohrstelle II die zweithöchsten und Bohrstelle III die niedrigsten Werte ergibt. Diese Rangfolge zeigt aber innerhalb der Gruppen mit den verschiedenen CCD-Winkeln quantitative Verschiebungen, die teilweise ausgeprägt sind.

Betrachtet man die Kalksalzkonzentrationen der einzelnen Bohrstellen bei einem CCD-Winkel zwischen 123° und 127° , der in etwa der Norm unseres Patientenkollektivs über 50 Jahre entspricht, als Vergleichswerte, sieht man, daß die anderen zu vergleichenden Gruppen deutlich niedrigere Werte aufweisen (Tab. 11). Innerhalb dieser Gruppe verhalten sich die einzelnen Bohrstellen folgendermaßen: Gegenüber Bohrstelle IV (= jeweils höchster Wert, daher als Bezugspunkt gesetzt) ist Bohrstelle II um 4,57 % und Bohrstelle III um 12,94 % erniedrigt.

Bei der Gruppe mit einem CCD-Winkel größer als 127° liegen die Kalksalzkonzentrationen allgemein für die Bohrstelle II um 8,44 %, bei Bohrstelle III um 11,29 % und bei Bohrstelle IV um 12,37 % tiefer als bei der Vergleichsgruppe.

Innerhalb dieser Gruppe fällt auf, daß sich Bohrstelle III stark von Bohrstelle IV abhebt (um 11,87 % kleinerer HA-Wert), Bohrstelle II jedoch nur um 0,29 % unter dem Wert der Bohrstelle IV liegt.

Weniger stark als in der vorherigen Gruppe ist der HA-Gehalt in der Klasse mit CCD-Winkeln kleiner als 123° verringert. In Bezug zu den Vergleichswerten der Gruppe mit Winkeln zwischen 123° und 127° liegen die HA-Werte der Bohrstelle II um 3,65 %, der Bohrstelle IV um 6,34 % tiefer, der Bohrstelle III jedoch um 0,87 % höher.

Innerhalb dieser Gruppe liegen die Werte für die einzelnen Bohrstellen äußerst eng beieinander: Bohrstelle II besitzt eine um 1,83 %, Bohrstelle III eine um 5,55 % kleiner Kalksalzkonzentration als die vergleichbare Bohrstelle IV. (Vergleiche Abb. 16).

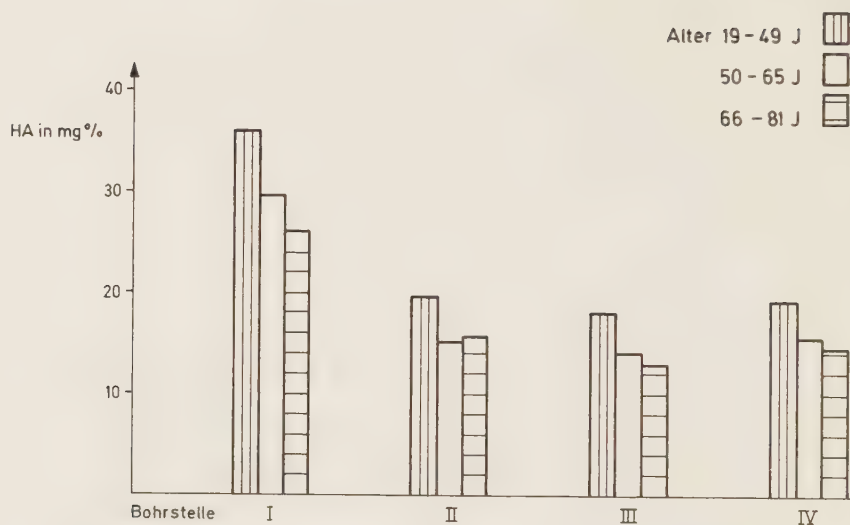


Abb. 15: Der Kalksalzgehalt an 4 verschiedenen Stellen des coxalen Femurendes (inmg% HA) eingeteilt in 3 Altersgruppen.

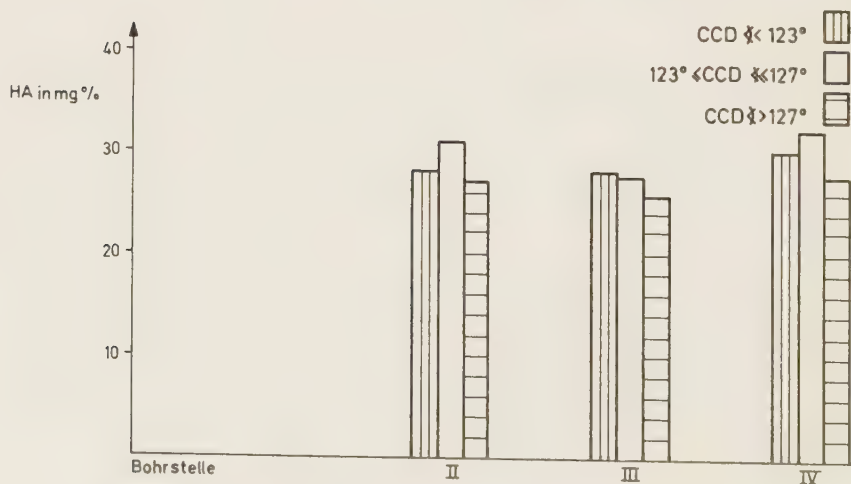


Abb. 16: Der Kalksalzgehalt an verschiedenen Stellen des coxalen Femurendes (in mg% HA) in Abhängigkeit vom Caput-Collum-Diaphysen (CCD-) Winkel.

HAAG-Werte für
Bohrstelle

Nr.	Alter	KAD	CCD	sex	I	II	III	IV
1	63	53	121	mas	22,30	13,94	14,81	17,16
2	69	60	120	fem	24,20	13,13	8,79	11,51
3	50	24	125	fem	24,25	22,79	12,22	11,97
4	68	40	124	fem	25,55	18,10	15,39	12,23
5	66	58	125	fem	25,45	11,84	18,25	15,52
6	68	5	123	mas	18,04	11,90	4,12	12,48
7	72	4	120	fem	29,69	14,92	9,88	12,74
8	72	2	137	fem	18,03	12,77	10,19	7,65
9	61	21	124	mas	19,48	11,53	5,79	19,40
10	42	14	118	mas	30,64	14,97	8,60	21,34
11	74	4	124	fem	24,00	13,35	13,41	13,05
12	64	7	120	mas	32,13	20,96	19,92	13,93
13	81	7	112	mas	18,73	15,47	13,09	14,58
14	65	25	151	fem	24,47	13,48	8,74	14,62
15	72	3	117	fem	34,98	11,59	14,38	12,68
16	46	35	122	fem	37,19	19,30	12,33	21,91
17	67	4	124	mas	22,55	19,00	14,90	17,48
18	73	8	116	mas	17,57	14,94	13,35	13,39
19	19	14	132	mas	40,33	26,97	18,81	17,46
20	67	3	122	fem	23,59	11,47	17,18	13,52
21	61	99	117	fem	25,50	17,61	24,50	11,47
22	77	67	111	mas	33,77	18,98	10,98	13,52
23	65	8	127	mas	30,66	19,92	10,77	16,88

HAAG-Werte für Bohrstelle								
Nr.	Alter	KAD	CCD	sex	I	II	III	IV
24	64	19	115	mas	28,65	13,92	13,60	20,10
25	80	78	125	mas	31,07	12,15	16,53	19,46
26	62	7	119	mas	38,73	14,04	22,80	23,09
27	58	4	123	fem	29,12	12,71	18,56	17,38
28	81	4	119	mas	25,35	13,61	11,41	13,17
29	51	7	120	mas	25,02	6,53	8,75	12,57
30	66	15	118	fem	25,86	17,80	10,14	13,59
31	61	41	130	fem	30,63	15,39	10,74	14,97
32	35	5	125	mas	38,95	20,92	17,16	18,59
33	65	4	123	mas	29,22	17,19	12,39	21,42
34	68	8	116	fem	37,15	19,29	15,52	18,06
35	28	22	122	mas	42,54	23,46	25,99	22,10
36	38	20	131	mas	33,38	13,68	29,47	15,99
37	54	9	130	fem	36,03	17,44	16,28	20,10
38	62	30	127	mas	32,80	12,82	6,31	14,24
39	62	5	139	mas	36,14	12,47	8,59	15,78
40	67	9	126	fem	28,36	18,09	14,76	13,35
41	59	16	129	mas	26,32	14,44	16,66	10,32
42	72	18	122	mas	33,83	13,78	13,19	15,76
43	63	6	132	mas	35,48	18,28	16,26	13,39

Tab.12: Der Kalksalzgehalt (in mg% HA = HAAG) von 43 ausgewählten Knochen in Abhängigkeit von der Bohrstelle, dem Geschlecht (Sex.), dem Caput-Collum-Diaphyse (CCD-) Winkel, der Krankenhausaufenthaltsdauer (KAD) und dem Alter. Alter in Jahren, KAD in Tagen, CCD-Winkel in Grad.

4. Diskussion

4.1. Die unterschiedlichen Konzentrationsangaben

4.1.1. Vergleich der volumen- und gewichtsbezogenen Kalksalzwerte.

Die in der einschlägigen Literatur übliche Konzentrationsangabe mg Hydroxylapatit/ml Knochen hat sich besonders von Seiten der Röntgenologie zur Beurteilung des Kalksalzgehaltes der Knochen bewährt (Heuck u. Schmidt 1960, Krokowski 1966, 1974, Kriester 1968).

Wiederholt unternommene Versuche diese "in vivo-Messungen" mit Untersuchung in vitro- also chemisch-analytisch - zu vergleichen (Virtama 1957, Heuck u. Schmidt 1960, Schmidt K.-W. 1974, Luther 1975, Lutz 1974), ergaben für verschiedene Knochen wie Finger, Wirbelkörper, Kalkaneus und Femurhals gute Übereinstimmungen, die durch immer neuere Referenzsysteme und exaktere Meßmethoden noch verbessert werden konnten.

Allerdings wurden bei den Untersuchungen in vitro Volumenmeßmethoden benutzt, die entweder sehr aufwendig (H e u c k u. S c h m i d t ermittelten das Volumen über das spezifische Gewicht und das Frischgewicht) und deshalb für eine größere Versuchsserie ungünstig waren, oder die einen erheblichen Meßfehler beinhalteten (S c h ü r g e r 1974 und S c h m i d t k.-W. 1974 errechneten das Volumen von Spongiosazylinder mit einer Schublehre).

Unsere Volumenmeßmethode, die auf dem einfachen archimedischen Prinzip der Wasserverdrängung beruhte (siehe 2.6.3.), war leicht zu handhaben, gut reproduzierbar und sollte der unregelmäßigen Form unserer Knochenzylinder Rechnung tragen. Da wir das Volumen nach dem Trocknen der Spongiosaprobe maßen, war bei Temperaturen über 100°C der größte Teil der Spongiosaporen infolge des verdampfenden Wassers fester verschlossen. Das Meßmedium Wasser benetzte nur die äußere Oberfläche. Auf diese Weise wollten wir verhindern, daß Wasser durch die Spongiosaporen ins Innere der Knochenzylinder dringt und somit niedrigere Volumenwerte bewirkt. Mit Hilfe von exakt geschnittenen Knochenzylindern (gerade Schnittfläche 90° zur Zylinderachse, keine abgesplitt-

ten Kanten) und einer Micrometerschraube überprüfen wir unsere Meßvorrichtung und fanden eine gute Übereinstimmung.

Trotzdem war - wie bei unseren Untersuchungen erwiesen - bei einer durchschnittlichen Meßgröße von 1 ml und einer Auflösung der Meßapparatur von 0,01 ml ein maximaler relativer Fehler von 20 % möglich. Aus diesem Grunde führten wir das Frischgewicht der Proben als Bezugseinheit ein, das wir sehr genau mit einer Analysenwaage bestimmen konnten (maximaler relativer Fehler = 0,03 %).

Wie auch weitere Untersuchungen zeigten, sind die gewichtsbezogenen Konzentrationsangaben für unsere Untersuchungen den volumenbezogenen von der Meßgenauigkeit her um ca. 10 % überlegen.

Benutzt man aber das Frischgewicht als Bezugseinheit, muß, entsprechend unserer Untersuchungsergebnisse, berücksichtigt werden, daß sich die Zusammensetzung der Spongiosa und damit das spezifische Gewicht der Proben mit zunehmendem Alter verändert bzw. durch Krankheiten oder andere Faktoren verändert ist. Der im Sinne einer Altersatrophie (W a g n e r 1965, K r o k o w s k i 1966), einer bestimmten Krankheit (A l b r i g h t 1949, C o u r v o i s i e r 1967), einer längeren Ruhigstellung (E i c h l e r 1970) etc. entstehen-

de Kalksalz- schließlich Spongiosaverlust wird vikariierend mit Knochenmark ersetzt (N e u m a n, N e u m a n 1958, B r a n d t et al. 1974). Aus diesem Grunde werden z. B. mit zunehmendem Alter die Kalksalzwerte in mg% HA relativ zu hoch, weil das im Nenner stehende Frischgewicht kleiner wird. Diese Tatsache könnte auch unsere Ergebnisse aus 3.7.3. und Tab. 10 erklären, die auffallend hohe HAAG-Werte der Patienten über 66 Jahre gegenüber den 50 - 65jährigen zeigen.

Außerdem beweisen gewichtsbezogene Konzentrationsangaben Unterschiede im Kalksalzgehalt des Knochens weniger deutlich als volumenbezogene, wie aus Tab. 7 und Abb. 11 ersichtlich und aus den oben genannten Tatsachen erklärbar wird.

Aus statistischen Gründen haben wir uns dennoch für die Konzentrationsangabe mg% HA für viele Fragestellungen entschieden. Auf Grund der geringen Zahl unserer Knochen und der relativ großen individuellen Schwankungsbreite der Kalksalzwerte konnten wir keinen Meßfehler von 12 - 20 % tolerieren, um nicht die Signifikanz unserer Aussagen zu gefährden.

Für weitere Untersuchungen empfehlen wir, eine Volumenmeßmethode mit kleinem Meßfehler zu suchen, um die Kalksalzwerte auf das Volumen beziehen zu können, da die

Konzentrationsangabe mg HA/ml Knochen deutlicher und früher Aussagen über Entkalkungserscheinungen am Knochen zulässt und damit geeigneter zur Diagnostik der Osteoporose erscheint als die Konzentrationen, die sich auf das Frischgewicht beziehen.

4.1.2. Vergleich der Konzentrationsangaben, (die Hydroxylapatit = Asche setzen, mit denen, die über die Kalziumkonzentration errechnet wurden).

Der anorganische Anteil des Knochens besteht aus Hydroxylapatit (B r a n d e n b e r g e r, S c h i n z 1948, B o u r n e 1956, S c h ü t t e 1963), der nach W e b e r, E a n e s und G e r d e s (1967) die Summenformel $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH}, \text{F})$ besitzen soll. Diese Formel enthält die Hauptmineralien im quantitativen Verhältnis zueinander, die bei der Veraschung von Knochenspongiosa (720°C , 3 Std.) zurückbleiben. Daneben sollen in der Asche noch die Elemente Na (0,9%), Mg (0,5 - 0,7 %), K (0,16 %) CL (0,08 %) und CO_3 (4,4 - 5,7 % des Aschegewichtes) und Spuren von Cu, Zn und Fe vorkommen (S c h ü t t e 1967, P e s c h, B r a n d t et al 1973), die nicht oder nur teilweise dem Apatitgerüst zugeordnet werden können.

Daraus ersieht man, daß die Gleichsetzung Asche = Hydroxylapatit zu keinen vollständig exakten Werten führt.

Ausgehend von der obigen Summenformel haben wir über die Kalziumkonzentration den HA-Gehalt errechnet (HAKG, HAKV) und mit den Werten verglichen die Asche = HA setzen.

Unsere über die Summenformel errechneten HA-Werte sind allgemein niedriger als die direkt mit Asche gleichgesetzten. Durch obige Ausführung verständlich weichen die HA-Werte des Caput femoris (Bohrstelle I) um 6,35 % , die Werte der Femurhals-Spongiosa (Bohrstelle II, III und IV) um durchschnittlich 7,8 % bei den Meßmethoden voneinander ab.

Dieser Unterschied mag darin begründet sein, daß der Markanteil in den distaleren Bezirken des coxalen Femurendes zunimmt, d. h. die Elemente vermehrt auftreten, aus denen sich das blutbildende Knochenmark zusammensetzt.

Man kann daraus schließen, daß die beiden Konzentrationsangaben umso besser korreliert sind, je dichter die Spongiosa und je geringer der Markanteil ist.

Neuere Arbeiten von B r a n d t 1974, L u t z 1974 und S c h m i d t H. weisen darauf hin, daß

Magnesium und Zink in ihrem Verhalten in Bezug auf Altersabhängigkeit und Lokalisation dem Kalzium der Knochenasche ähneln, das wiederum zum allergrößten Teil aus dem Hydroxylapatit stammt. Dabei sollen die Magnesium-Werte um 2 und die des Zink um 4 Zehnerpotenzen unter denen des Kalziums liegen. Man kann also annehmen, daß diese beiden Elemente (Mg und Zn) in irgendeiner Weise in das Gerüst des Hydroxylapatits eingebaut sind. Die oben genannte Summenformel wäre in dieser Richtung zu ergänzen. Dies würde auch zu einer weiteren Annäherung der errechneten und der mit Asche gleichgesetzten Konzentrationsangaben führen.

Zusammenfassend ist auszusagen, daß nach unseren Untersuchungen eine Konzentrationsangabe für den Kalksalzgehalt im Knochen, die sich auf das Volumen bezieht und die indirekt über die sehr genaue Kalziumbestimmung im Flammenphotometer durchgeführt wird, die verlässlichsten chemisch-analytischen Ergebnisse liefert. Die Unterschiede im Kalksalzgehalt lassen sich unabhängig vom jeweiligen spezifischen Gewicht oder vermehrten Knochenmarkanteilen am deutlichsten bestimmen.

4.2. Die Zusammensetzung der Spongiosa an verschiedenen Stellen des coxalen Femurendes (Wasser, organische und anorganische Substanz).

Die Spongiosa des coxalen Femurendes ist gemäß ihrer Funktion verschieden zusammengesetzt, (R o u x 1895). Das ist schon makroskopisch anhand der veraschten Knochenzylinder der verschiedenen Bohrstellen festzustellen (R o u x 1896).

Am Ort der stärksten Belastung, dem Oberschenkelkopf, (P a u w e l s 1965) ist der anorganische Anteil am größten (Bohrstelle I), nimmt aber hier im Laufe des Alters am stärksten ab (ca. 30 %). Im Schenkelhals und im Übergang Schenkelhals/-Diaphyse (Bohrstelle II, III und IV) liegt der Anteil der anorganischen Substanz nur halb so hoch und sinkt in älteren Jahren nicht so stark ab (19 %). Den größten Wassergehalt besitzt die Spongiosa des Schenkelhalses (Bohrstelle II, III) mit 26,92 Gewichts-% für das Alter über 50 Jahre. Dieser gegenüber der Spongiosa des Caput femoris stark vermehrte Wasseranteil (ca. 40 %), beweist das Vorhandensein blutbildenden Knochenmarkes (B r a n d t et al. 1974).

Auffallend und zunächst unerklärlich ist die Zunahme des Wassergehaltes um durchschnittlich 4,6 % im Alter über 66 Jahre, die aber auch in den Arbeiten von N e u m a n, N e u m a n 1958, N o r d i n 1973, L u t z 1974 und S c h m i d t H. beschrieben wird.

Diese Zunahme des H_2O -Gehaltes ist mit einer Abnahme des organischen Anteiles in der Altersgruppe über 66 Jahre verbunden (um ca. 5,0 %). Ansonsten ist die organische Substanz in jüngeren Jahren im untersuchten coxalen Femurende annähernd gleich groß. Später steigt ihr Anteil mit zunehmendem Alter um durchschnittlich 38 % (50 -65 Jahre), um für das Alter über 66 Jahre im Schenkelkopf nochmals um 8 % zu klettern.

Gegenüber der gleichmäßigen Verteilung der organischen Substanz in den untersuchten Bohrstellen I - III hebt sich Bohrstelle IV etwas ab. Hier liegt ihr Anteil für die Altersgruppe unter 50 Jahre um 15 % über dem Durchschnitt der anderen Bohrstellen. Diese Bohrstelle IV ist am Übergang des Schenkelhalses in die Femurdiaphyse, in der Mitte der Linea intertrochanterica lokalisiert (Abb. 8). Durch diese Stelle zieht das sog. Zugbündel (W a r d 1838,

P a u w e l s 1954, K u m m e r 1962) bzw. die zweischarige affine Zergleitung und das Trajektorium reprimens (C a t e l 1970). Bei der im Verbundbau anorganische Substanz/Kollagenfaser konstruierten Spongiosa (K n e s e 1958) leisten besonders die Kollagenfasern Widerstand gegen Zugbeanspruchungen, so daß in den Spongiosabezirken, die besonderen Zugkräften ausgesetzt sind, diese organischen Fasern in vermehrtem Maße auftreten. Wahrscheinlicher dürfte aber sein, daß an dieser Stelle der Anteil des blutbildenden Markes größer ist und dieser Fettmark die höheren "org"-Werte bedingt. Diese Tatsache könnte für die erhöhten Anteile der organischen Substanz in Bohrstelle IV verantwortlich sein. Allerdings gleichen sich diese "org"-Werte mit zunehmendem Alter denjenigen aus dem Schenkelhals an, was zusammen mit dem Abfall der organischen Substanz des Schenkelhalses im Alter über 66 Jahre der heute abgelehnten A l b r i g h t ' schen Knochenmatrix-Theorie der Osteoporose entsprechen würde.

Vergleicht man unsere Ergebnisse über die Zusammensetzung der Spongiosa an verschiedenen Stellen des coxalen Femurendes mit den Werten von N e u m a n ,

N e u m a n 1958, N o r d i n 1973, L u t z 1974 und S c h m i d t H., ergibt sich eine gute Übereinstimmung in den Altersbewegungen. Quantitativ weichen unsere Werte etwas von denjenigen der oben genannten Autoren ab, da wir im Gegensatz zu ihnen reine Spongiosazylinder untersucht haben und damit auf Grund der fehlenden Kortikalis kleinere Gewichtsprozentage für die anorganischen Anteile erhalten haben. Im Gegensatz sind unsere Werte für die organische Substanz erhöht.

4.3. Der Kalziumgehalt der veraschten Knochenproben.

Unsere Ergebnisse aus diesen Untersuchungen stimmen gut mit den Werten von S c h ü t t e (1963) überein, der einen Ca-Anteil von 35-37 % der Knochenasche angibt. Gegenüber den Ergebnissen von N e u m a n, N e u m a n (1958), C a l d w e l l und C o l l i n s (1961) und L u t z (1974), die Werte um 40 % ermittelten, sind unsere Kalziumkonzentrationen erniedrigt. Die Begründung liegt darin, daß letztgenannte Autoren Spongiosa und Compacta zusammen untersuchten und durch den höheren Ca-Gehalt der Knochen-Compacta höhere Endwerte erhielten.

Trotz einer gewissen Konstanz der Ca-Konzentrationen, scheint dennoch eine Abhängigkeit von der Lokalisation im Skelett vorhanden zu sein. So kann man in unseren Ergebnissen (Tab. 6) kleine lokale Unterschiede bemerken: Die Ca-Werte des Oberschenkelkopfes (Bohrstelle I) liegen um 1-2 % über denen des Schenkelhalses.

Auch H. S c h m i d t stellte in seiner Arbeit fest, daß im LWK V die Ca-Konzentration höher war als im LWK III. Noch höhere Werte maß er für den Oberschenkelhalsbereich.

Wir folgern daraus, daß jene Stellen im Skelett, die stärkeren Belastungen ausgesetzt sind, wie z.B. LWK V und Oberschenkelkopf, nicht nur mit einer Zunahme der Spongiosadichte (Z e i g e r 1933) bzw. einem anderen Spongiosatyp (R o u x 1922, C a t e l 1970) antworten, sondern auch mit einer stärkeren Verkalkung der Mikrofibrillen des Verbundes Kollagenfaser/Hydroxylapatit (A s c e n z i 1955, K n e s e 1958).

Das von K r o k o w s k i (1975) und H. S c h m i d t beschriebene Ansteigen des Kalziumgehaltes im Alter über 80 Jahre deckt sich angedeutet mit unseren Ergebnissen am Oberschenkelkopf. Hier steigt die Kalziumkonzentration mit zunehmendem Alter leicht an und erreicht in der Altersgruppe 66-81 Jahre die ab-

solut höchsten Werte unserer Untersuchungen. Dies ist umso erstaunlicher als der Kalksalzgehalt an derselben Stelle in der präsenilen und senilen Altersphase permanent absinkt.

Wir erklären uns diese Tatsache damit, daß bei zunehmender Rarifizierung der Knochenspongiosa im Alter im Sinne einer physiologischen Osteoporose (U e h l i n g e r 1973, J e s s e r e r 1975, F r i c k e , K r o k o w s k i 1975) gleichzeitig eine stärkere Verkalkung der organischen Anteile im Verbund Kollagenfaser/Hydroxylapatit stattfindet, umso ausgeprägter an den Stellen, die den größten Belastungen, besonders Wechselbelastungen ausgesetzt sind. (G l i m c h e r 1960). Auf diese Weise könnte eine Zunahme der Ca-Konzentration der Asche und eine Abnahme der Asche (= HA) pro Volumen oder Frischgewicht verstanden werden.

Unsere Ergebnisse, die einen ziemlich konstanten Ca-Gehalt in allen Altersstufen und Lokalisationen (Ausnahme Bohrstelle I (=Caput femoris)) zeigen, widersprechen zunächst den Aussagen von K u h l e n c o r d t (1971), der eine Untermineralisation des altersatrophen, osteoporotischen Knochens annimmt. Würde eine Untermineralisation vorliegen, könnte man die relativ hohe Ca-Konzentration im Alter auf die zunehmende Verkalkifizierung der organischen Microfibrillen zurückführen.

4.4. Der Kalksalzgehalt an verschiedenen Stellen des coxalen Femurendes.

Geht man davon aus, daß das coxale Femurende funktionell gestaltet ist, dann entsprechen an jeder Stelle Dicke, Dichte und Zahl der Bälkchen der anfallenden Beanspruchung. Die Spongiosaelemente werden mit einer minimalen Kraft auf Zug oder Druck belastet (R o u x 1896). Unter dieser Voraussetzung würde eine direkte Beziehung zwischen Belastung und Spongiosadichte bestehen. (P a u w e l s 1965).

In unseren Untersuchungen fanden wir im Oberschenkelkopf doppelt so hohe Kalksalzwerte wie im Schenkelhals, was die enormen Belastungen ausdrückt, denen dieser Skeletteil ausgesetzt ist. (K ü n t s c h e r 1935, 1936, P a u w e l s 1965, K n i e f 1967, A m t m a n n , K u m m e r 1968). Auf den, im Sinne einer Druckaufnahmeplatte gestalteten Femurkopf (C a t e l 1970) wirkt beim einbeinigen Stand eine Kraft, die das vierfache der Körperschwerkraft übersteigt und beim Gehen, Laufen und Springen durch dynamische Momente noch beträchtlich anwächst (P a u w e l s 1965). Sie setzt sich als Resultierende aus der senkrecht

nach unten ziehenden Körperschwerkraft und der Kraft der Abduktoren zusammen, die am Trochanter major angreifen und ein Absinken des Beckens in der Einbein-
Standphase verhindern. Die Richtung dieser Resultierenden ist durch den Schnittpunkt der beiden Kräfte und den Drehpunkt des Hüftgelenkes (= Zentrum des Oberschenkelkopfes) gegeben.

Dadurch daß die Resultierende schräg zur Schenkelhalsachse verläuft (Abb. 5 rechts), wird das coxale Femurende auf Biegung beansprucht. Diese Biegebeanspruchung nimmt nach abwärts zu, weil der Abstand der Resultierenden von der Schenkelhalsachse nach unten hin größer wird. Dadurch wird verursacht u.a. die laterale Zugbelastung, deren morphologisches Äquivalent das sog. Zugbündel ist.

Die Schubkomponente der Resultierenden, der Balkenschub, hat dagegen in jeder Höhe des coxalen Femurendes die gleiche Größe, weil die Größe des Balkenschubs allein durch die Neigung der Druckrichtung gegen die Schenkelhalsachse bestimmt wird. Die Schubkräfte erreichen ihre größten Werte in der Schenkelhalsmitte und nehmen zur Peripherie hin ab.

(P a u w e l s 1965).

Der Gelenkdruck ist ungleichmäßig über die Gelenkfläche verteilt. Er hat seinen größten Wert im Bereich des Durchstoßpunktes der Resultierenden durch

die Mitte des Pfannendaches und fällt von dieser Stelle leicht nach beiden Seiten hin ab. Die Druckspannungen stehen senkrecht auf der Gelenkfläche und sind zunächst auf das Gelenkzentrum gerichtet. Mit zunehmendem Abstand von der Gelenkfläche divergiert die Richtung der Druckspannungslinien mehr und mehr, so daß sie in Höhe des Gelenkzentrums schon einen mehr parallelen Verlauf aufweisen und diesen fortsetzend, etwa in Richtung der Resultierenden auf die mediale Kortikalis zulaufen, wo sie in den Adambogen einmünden (Abb. 5). In einem durch das Drehzentrum des Schenkelkopfes gelegten Querschnitt müßten demnach die höchsten Druckspannungen auftreten. Da nach P a u w e l s an dieser Stelle auch die Schubspannungen ihre höchsten Werte erreichen, und das Zugbündel hier zur medialen Schenkelkopfseite kreuzt, sind die, für unsere Untersuchungen absolut höchsten Kalksalzwerte dieser Region leicht verständlich. Dabei stimmen unsere Ergebnisse mit denen aus den Arbeiten von H e u c k und S c h m i d t (1960), und L u t z (1975) überein.

Völlig verschieden von der Beanspruchung des **Schenkelkopfes** ist die Beanspruchung des Schenkelhalses. Diese kann in erster Annäherung mit der Beanspruchung

eines auf Biegung belasteten Balkens verglichen werden. Da die Biegungsebene nahezu konstant in frontaler Richtung liegt, treten die höchsten Druck- und Zugspannungen aus der Biegung am lateralen und medialen Rande des Querschnitts auf, während in der Mitte des Querschnittes, im Bereich der neutralen Ebene, keine oder nur sehr kleine Biegespannungen wirken. Die höchsten Spannungen aus dem Balkenschub treten in der Mitte des Querschnittes des Schenkelhalses auf. Da die Wirkungslinie des resultierenden Druckes beim Schenkelhals nahezu überall die gleiche Neigung gegen seine Achse hat, so sollten auch die Schubspannungen in jeder Höhe des Schenkelhalses die gleiche Größe haben. Dieser Rückschluß ist jedoch nicht erlaubt, weil der Schenkelhals im Gegensatz zu dem zum Vergleich herangezogenen Balken nicht in jeder Höhe den gleichen Durchmesser hat. Denn der Schenkelhals weist sowohl gegen den Schenkelkopf als auch gegen das Trochanterende hin eine konische Verbreiterung auf. Eine konische Verbreiterung hat aber zur Folge, daß außer den durch den Balkenschub bedingten Spannungen zusätzliche Schubspannungen auftreten, die durch die konische Form bedingt sind und die je nach der Richtung, nach welcher der Durchmesser zunimmt, ein umgekehrtes Vorzeichen haben, also die Schubspannungen aus dem Balkenschub erhöhen oder erniedrigen. Teilt

man den Schenkelhals in eine proximale und eine distale Hälfte (Abb. 8), so würde im oberen Bereich des Schenkelhalses, in welchem sein Durchmesser gegen den Schenkelkopf hin zunimmt, der Konusschub die gleiche Richtung wie der Balkenschub haben, so daß sich die Spannungen aus beiden Schubarten summieren. In der distalen Hälfte des Schenkelhalses nimmt sein Durchmesser gegen das Trochanterende hin zu, also in umgekehrter Richtung wie oben. Infolgedessen hat der Konusschub ein umgekehrtes Vorzeichen wie der Balkenschub, so daß in diesem Bereich, dem das Wardsche Dreieck angehört, der Balkenschub durch den Konusschub herabgesetzt oder ganz aufgehoben wird (Spongiosaaussparung im Bereich des Wardschen Dreieckes). In dem weiter distal liegenden Bereich, im Übergang des Schenkelhalses in die Schenkeldiaphyse, soll kein Konusschub auftreten, weil hier der tragende Anteil des Schenkelhalses durch das Zugbündel der Spongiosa begrenzt wird, das wie auf Abb. 5, 6 und 7 zu erkennen, eine der medialen Kontur des Schenkelhalses nahezu parallele Verlaufsrichtung aufweist, und hier keine konische Verbreiterung zu bemerken ist. Es sollen in dieser Region nur Schubspannungen aus dem Balkenschub vorherrschen, was mit einer geringeren Spongiosadichte als in der oberen

Schenkelhalszone verbunden sein sollte.

Diese von P a u w e l s angestellten theoretischen Überlegungen über die auftretenden Spannungen im coxalen Femurende sind durch spannungsoptische Versuche durch ihn selber (1949, 1965) und die Arbeiten von K u m m e r (1955, 1968) und K n i e f (1967), soweit es das Versuchsmodell erlaubte, bestätigt worden.

Diesen spannungsoptischen Modellen spricht C a t e l (1970) ihre heuristische Bedeutung für die Untersuchungen der Spannungsverteilung im coxalen Femurende ab. Er hat an Dünnschliffen des coxalen Femurendes alle markanten Spongiosazüge eingemessen und versucht, aus den Winkelbestimmungen Aufschluß darüber zu gewinnen, ob ein Zusammenhang zwischen den Beanspruchungen des Oberschenkelknochens und dem Verlauf der großen Spongiosazüge (Trajektorien) besteht. Er hat u. a. gefunden, daß die Substantia spongiosa in drei großen Trajektorien der Druck- und Zugbeanspruchung des coxalen Femurendes Widerstand leistet (siehe 2.2., Abb. 6).

Gegenüber den Auffassungen von W a r d (1838), R o u x (1885), P a u w e l s (1965), K n i e f (1967) und K u m m e r (1968), die alle von einem lateralen Zugbündel sprechen, bezeichnet C a t e l das, besonders in der Übergangsregion von Femurhals

in Femurschaft stark ausgebildete Spongiosabündel als ein System einer schrägen Pressung. Diese schiefe affine Pressung, analog einer zweischarigen, ungleichartigen Zergleitung bei Gesteinsdeformation, soll die parallel zu einer potentiellen Verschiebungsfläche auftretenden Schubspannungen abbilden.

In der Knochenmitte des coxalen Femurendes, wo nach P a u w e l s die größten Schubspannungen herrschen, glaubt er auf seinen Dünnschliffen Spongiosazüge zu erkennen, die nach Art eines mit der Spitze proximalwärts gerichteten Kegels angeordnet sind und die typische Form für eine Druckkonstruktion zeigen sollen (= Trajektorium reprimens, Abb. 6).

Unsere Ergebnisse über den Kalksalzgehalt an verschiedenen Stellen des Schenkelhalses sind direkt mit der dort herrschenden Spongiosadichte korreliert, können aber keine der oben beschriebenen Theorien als alleinig richtige bestätigen. Sie ergeben aber Hinweise in die eine oder andere Richtung.

Unsere Bohrstelle II liegt in der proximalen Schenkalhalshälfte außerhalb des medialen Druckbündels, wo nach Pauwels Konusschub und Balkenschub in der gleichen Richtung wirken, und die vom Zugbündel bzw.

von der zweischarigen affinen Zergleitung durch-
zogen wird. Bohrstelle III ist in der distalen
Schenkelhälfte, wo besonders niedrige Schubkräfte
auftreten sollen, im Bereich des Wardschen Drei-
ecks lokalisiert. Die IV. Knochenprobe wurde aus
dem Übergang Schenkelhals/-Diaphyse, in der Mitte
der Linea intertrochanterica entnommen (siehe 2.5.,
Abb. 8), der nach P a u w e l s vom Zugbündel ge-
striffen und vom Balkenschub allein beansprucht wer-
den soll, nach C a t e l das Trajektorium repri-
mens und die zweischarige affine Zergleitung bein-
halten soll.

Überraschender Weise ist der Unterschied zwischen
Bohrstelle II (Balkenschub + Konusschub) und Bohr-
stelle III (Balkenschub - Konusschub, Wardsches Drei-
eck) nicht so hoch, wie nach den Berechnungen von
P a u w e l s erwartet (12,0 %). Das mag auch daran
liegen, daß durch unseren relativ großen Bohrer einige
Male das mediale Druckbündel bzw. ev. die Kortikalis
mit angebohrt wurde, was für Bohrstelle III zu hohe
Kalksalzwerte ergeben hätte. Betrachtet man Tab. 12
genauer, so fällt auf, daß dies wahrscheinlich für
die Knochennummern 5, 20, 21, 26, 27 und 36 zutref-
fen könnte. Andererseits zeigen die extrem niedrigen

Kalksalzwerte der Knochennummern 2, 6, 7, 9, 10, 14, 38, 39, 41, daß der Kalksalzwert der Bohrstelle III direkt mit der spongiosaarmen Struktur des Wardschen Dreieckes in Beziehung steht.

Die Bohrstelle IV sollte nach P a u w e l s aus einem gegenüber Bohrstelle II deutlich spongiosaärmeren Gebiet stammen. Bei unseren gewichtsbezogenen Konzentrationsangaben sind die Werte der beiden Bohrstellen nahezu identisch, bei den volumenbezogenen Werten liegt Bohrstelle IV sogar um 4,55 % höher als Bohrstelle II.

Wir vermuten, daß für den Übergang Schenkelhals/-Diaphyse die Überlegungen P a u w e l s ' nicht ganz zutreffen, sondern stimmen eher den Untersuchungen C a t e l s zu, da der von uns gemessene Kalksalzwert in diesem Bereich wahrscheinlicher den von C a t e l postulierten Spannungen entspricht. Der in 4.2. diskutierte erhöhte "org".-Wert der Bohrstelle kann im Sinne einer vermehrten Beanspruchung und damit Hypertrophie bzw. Hyperplasie der Kollagenfasern im Verbund der Spongiosa sowohl durch Zugkräfte als auch durch Schubkräfte (führen zur zweiseitigen Zergleitung) bedingt sein.

Für den Schenkelhals selbst entsprechen unsere Ergebnisse sowohl der Theorie von P a u w e l s als

auch der von C a t e l .

Vergleicht man unsere Kalksalzwerte vom Schenkelhals mit den Ergebnissen von H e u c k und S c h m i d t (1960), P e s c h, B r a n d t , K a h l e , L u t h e r et. al. (1975), L u t z (1975) und H. S c h m i d t so sind unsere Konzentrationen deutlich niedriger. Das mag darin begründet sein, daß wir die spongiosadichten Bereiche des Schenkelhalses (mediales Druckbündel) nicht mit erfaßt haben und die beiden letzten Autoren die Spongiosa zusammen mit der Kortikalis untersucht haben.

4.4.1. Der Kalksalzgehalt an verschiedenen Stellen des coxalen Femurendes in Abhängigkeit vom Caput-Collum-Diaphysen(CCD)-Winkel.

Wie oben beschrieben hängt die Trajektorienstruktur und die Spongiosadichte im coxalen Femurende von den dort herrschenden Spannungen ab. Diese werden primär durch den Winkel bedingt, den die Hüftgelenksresultierende mit der Schenkelhalsachse bildet. Nimmt man die Richtung der Resultierenden als konstant an, ändern sich dieser Winkel und damit die Kraft-Lastverhältnisse im coxalen Femurende mit zu- oder abnehmendem CCD-Winkel.

Nach den Gesetzen der kausalen Morphologie bzw. der Biomechanik (R o u x 1905, Z e i g e r 1933, P a u w e l s 1965, C a t e l 1970) paßt sich die Spongiosa diesen veränderten Belastungen an, d. h. daß an definierten Punkten, abhängig vom CCD-Winkel, eine unterschiedliche Spongiosadichte gemessen werden müßte.

Analog den Überlegungen von P a u w e l s über den Schenkelhalsbruch steigen bei zunehmender Coxa vara die Bieigungs-, Schub- und Scherkräfte beträchtlich an, da die Schenkelhalsachse und Resultierende einen großen Winkel bilden. Man erwartet also zunächst eine Verdickung der medialen Cortikalis, da sie hauptsächlich wenn nicht ausschließlich (C a t e l 1970) Widerstand gegen Bieigungskräfte leistet. Im gleichen Sinne müßten das Zugbündel bzw. die zweischarige affine Zergleitung bei Schub durch größeren Zug und Balkenschub deutlicher ausgeprägt sein.

Bei einer Coxal valga verkleinert sich der Winkel aus der Hüftgelenksresultierenden und der Schenkelhalsachse und die genannten Schub-, Scher- und Bieigungskräfte nehmen ab. Es überwiegen die "reinen" Druckkräfte, die im Schenkelhals zu einer feingezeichneten Plättchen-Spongiosa (R o u x 1895, K n i e f 1967) führen sollten. Diese Überlegungen setzen voraus, daß

die einwirkenden Kräfte vorwiegend in der Frontalebene angreifen.

Die beiden Röntgenbilder aus Abb. 14 scheinen diese theoretischen Ausführungen zu bestätigen. Auch unsere Ergebnisse, niedergelegt in Tab. 11, Abb. 16, stimmen teilweise damit überein.

So beweisen die unter dem Durchschnitt liegenden Kalksalzwerte bei einer Coxa valga (CCD-Winkel größer als 127°), den geringen Materialaufwand einer überwiegenden Druckkonstruktion (Pauls 1955, Knief 1967). Der Schenkelhals wird hier axial belastet und antwortet im Sinne eines funktionellen Systems mit minimaler Dicke, Dichte und Zahl der Bälkchen.

Auf Grund der für die Coxa vara angestellten Überlegungen erwartet man für CCD-Winkel kleiner als 123° erhöhte Kalksalzwerte im Oberschenkelhals. In unseren Ergebnissen findet man jedoch gegenüber der Norm erniedrigte Kalksalzkonzentrationen (Tab. 11). Wir erklären uns diese Tatsache damit, daß unsere Patienten mit einem CCD-Winkel kleiner als 123° fast ausschließlich dem Senium entstammten und somit vermehrt der altersphysiologischen Spongiosararefizierung (4.4.3) unterworfen waren. Andererseits würde die

These C a t e l s bekräftigt werden, daß nicht die Spongiosa sondern ausschließlich die Cortikalis Biegebeanspruchungen entgegenwirkt.

4.4.2. Der Kalksalzgehalt an verschiedenen Stellen des coxalen Femurendes in Abhängigkeit vom Geschlecht und der Krankenhausaufenthaltsdauer

Entgegen den Untersuchungen von H e u c k und S c h m i d t (1960) am Femurhals, H a a s n e r , R a c h , K r o k o w s k i (1967) an der Wirbelsäule und L u t h e r (1975) am Calcaneus und an Wirbelkörpern, die bei Frauen eine stärkere Abnahme des Hydroxylapatits im Alter feststellten, beweisen unsere Werte keine eindeutigen Geschlechtsunterschiede, was auch den Ergebnissen von H. S c h m i d t entspricht. Gliedert man allerdings die Mittelwerte über das coxale Femurende in die einzelnen vier Bohrstellen auf (Tab. 8), so erkennt man im Schenkelhals (Bohrstelle II und III) eine Geschlechtsabhängigkeit, die die Aussagen der oben genannten Autoren bestätigt: Für die Altersgruppe über 50 Jahre liegen die Kalksalzwerte der Frauen um 6,3 - 8,5 % unter denen der Männer.

E i c h l e r (1970) beobachtete bei längerer Ruhigstellung im Gipsverband eine Entkalkung des betreffenden Knochens. Auch aus der Raumfahrtmedizin ist bekannt, daß längere Aufenthalte im schwerelos-
sen Raum zu Entkalkifizierungserscheinungen am Skelett führen. Diese mit dem Begriff "Inaktivitäts-osteoporose" zusammengefaßten Erscheinungen beruhen darauf, daß ein verminderter oder aufgehobener Druck- oder Kraftreiz zu einer verminderten Mineralisation des Knochens führt (J o w s e y 1971, N o r d i n 1973, M e u n i e r et al. 1973).

Wir haben bei unseren Patienten die Krankenhaus-aufenthaltsdauer prae mortem notiert und diese mit einer mehr oder minder ausgeprägten Inaktivität infolge Krankenlagers gleichgesetzt. In unseren Ergebnissen fällt auf, daß hauptsächlich der starkbelastete Oberschenkelkopf mit einer Verminderung des Kalksalzgehaltes reagiert (Tab. 9).

Bei der physiologischen Altersatrophie oder senilen Osteoporose sollen die stark belasteten LWK V weniger deutliche HA-Vermindierungen zeigen als die LWK III (P e s c h, B r a n d t, K a h l e, L u t h e r et al. 1975) bzw. einen weniger steilen Abfall der Kalziumkonzentration/Volumen (H. S c h m i d t). Dieser Unterschied der senilen Osteo-

porose zur Inaktivitätsosteoporose wird auch in der Arbeit von K r e m p i e n et al. (1975) behandelt. Durch rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen und Osteocytenhistogramme kommt er zu dem Schluß, daß der Einfluß des Alters auf die Skelethomöostase nur gering sei und hinter Wirkungen hormoneller Störungen und der Immobilisation zurückbleibe. Jedoch sind letztere direkt mit dem Alter korreliert, da Involution und Atrophie entsprechender Drüsen mit zunehmendem Alter zu hormonellen Ausfällen (N o r d i n 1963, N e u m a n, N e u m a n 1958) und hormonelle Ausfälle zu Involution und Rarifikation der Spongiosa führen (M e u n i e r et al. 1973).

4.4.3. Der Kalksalzgehalt an verschiedenen Stellen des coxalen Femurendes in Abhängigkeit vom Alter.

In vielen Untersuchungen hat man mit den unterschiedlichsten Methoden - chemisch-analytisch, röntgenologisch, szindigrafisch, histiometrisch zsw. - festgestellt, daß der Kalksalzgehalt der Knochen mit zunehmendem Alter abnimmt (H e u c k und S c h m i d t 1960

W a g n e r 1965, K r o k o w s k i 1966,
C h a l m e r s 1973, U e h l i n g e r 1974,
M e u n i e r et al. 1973, J e s s e r e r 1975,
L u t h e r 1975). Diese physiologische Osteoporo-
se steht im Gegensatz zur pathologischen Rarifizie-
rung der Spongiosa, deren Früherkennung man heute mit
den subtilsten naturwissenschaftlichen Methoden an-
strebt.

Die verschiedenen Skelettabschnitte sind quanti-
tativ in verschiedenen Ausmaßen diesem altersatrophischen
Prozeß unterworfen, wie L u t h e r (1975) in sei-
nen Untersuchungen über den Calcaneus und Lendenwir-
belkörpern, P e s c h, B r a n d t et al. (1975),
und H. S c h m i d t am LWK III und V und Ober-
schenkelhals feststellten.

Auch das coxale Femurende zeigt in sich an ver-
schiedenen Lokalisationen ein unterschiedliches Ver-
halten gegenüber den altersgemäßen Umbauvorgängen
(Tab. 10, Abb. 15).

Am schnellsten sinkt der Kalksalzwert im Ober-
schenkelhals, wo er in unseren Untersuchungen in
der Altersgruppe von 50 - 65 Jahre schon seinen End-
wert erreicht. Damit ist die Wahl des Oberschenkel-
halses zur Frühdiagnose der Osteoporose (M e u c k
und S c h m i d t 1960) gerechtfertigt. Weniger

rasch aber konstanter sinkt die HA-Konzentration im Oberschenkelkopf und im Übergang Schenkelhals/-Diaphyse. Dabei finden wir bei der letzten Lokalisation den größten Kalksalzverlust. Daß an starkbelasteten Knochen der Kalksalzgehalt weniger absinkt, stimmt mit oben genannter Literatur überein. Doch sinken hier in späteren Jahren (Älter als 66 Jahre) die Werte weiter und erreichen schließlich eine Abnahme von 29,5 bzw. 33,6 % gegenüber der Altersgruppe unter 50 Jahre. Sie unterscheiden sich damit nicht von den weniger belasteten Stellen des Schenkelhalses, die eine Gesamtabnahme von 26,8 bzw. 29,7 % zeigen.

Diese altersabhängige Kalksalzabnahme bestätigt die Angaben von Krokowski (1967), der für die senile Osteoporose eine Hydroxylapatitverminderung von 20 - 40 % beschreibt.

5. Zusammenfassung

Von 54 Sektionsfällen, an denen auf Grund der Anamnese keine Osteoporose zu erwarten war, wurde das rechte coxale Femurende entnommen. Aus ihm bohrte man an vier definierten Stellen Knochenzylinder, deren mittleres Drittel (10 mm Durchmesser, ca. 10 mm Länge) verarbeitet wurde. Man bestimmte Frisch-, Trocken-, Aschegewicht und Vo-

lumen dieser Knochenzylinder. Mit einem Flammenphotometer maß man die Kalziumkonzentration der Asche. Der Kalksalzgehalt der Proben wurde einmal in Aschegehalt, bezogen auf das Frischgewicht oder das Volumen angegeben, zum anderen errechnete man den HA-Gehalt über die Kalziumkonzentration. Die Zusammensetzung der Spongiosa des coxalen Femurendes ist abhängig von der Lokalisation: Der anorganische Anteil des Oberschenkelkopfes ist doppelt so groß als im Schenkelhals; in diesem aber der Wassergehalt um 40 % höher liegt. Die organische Substanz ist im coxalen Femurende überall annähernd gleich groß. Sie nimmt vikariierend zur Abnahme des anorganischen Anteils mit zunehmendem Alter zu. Die Knochenasche besteht unabhängig von der Lokalisation und dem Alter zu 35,5 % aus Kalzium.

Bei den Konzentrationsangaben für den Hydrxylapatit ist die Fehlerwahrscheinlichkeit für gewichtsbezogene Werte um mindestens 10 % niedriger als bei volumenbezogenen, die allerdings Unterschiede im Kalksalzgehalt deutlicher aufzeigen. Der rechnerisch über die Ca-Konzentration ermittelte HA-Wert ist durchschnittlich um 7 % kleiner als der mit der Asche gleichgesetzte.

Es treten deutliche Unterschiede im Kalksalzgehalt

am coxalen Femurende auf, die mit den biomechanischen Gesetzen im Einklang stehen. So ist die HA-Konzentration im Oberschenkelkopf doppelt so hoch wie im Schenkelhals. Die niedrigsten Werte treten im Bereich des Wardschen Dreieckes auf.

Während in unseren Ergebnissen keine Geschlechtsabhängigkeit der Kalksalzwerte gefunden werden konnte, zeigte sich eine gewisse Beziehung zur Krankenhausaufenthaltsdauer, die bei längerer Immobilisation zu einer Abnahme des HA-Wertes primär am Oberschenkelkopf führte.

Die altersgemäße Kalksalzverminderung beginnt dagegen am Schenkelhals eher und ausgeprägter.

Es konnte eine Beziehung zwischen dem CCD-Winkel und den Kalksalzwerten im Schenkelhals hergestellt werden, die mit den Grundsätzen der kausalen Morphologie erklärbar ist.

6. Literaturverzeichnis

1. Albright F., E.C. Reifenstein: The Parathyreoid Glands an metabolic Bone Disease,
Williams and Wilkins, Baltimore (1949)
2. Amtmann E., B. Kummer: Die Beanspruchung des menschlichen Hüftgelenkes. Größe und Richtung der Hüftgelenksresultierenden in der Frontalebene. Z. Anat. Entwickl. Gesch. 127 (1968)
3. Ascenci, A.: Die Knochengewebsstruktur untersucht mit dem Elektronenmikroskop
Sci. Ital. 8, 701 - 730 (1955)
4. Bargmann, W.: Histologie und mikroskopische Anatomie des Menschen
G. Thieme, 6. Aufl., Stuttgart (1967)
5. Becher, H., K. Hoegen, G. Pfefferkorn: Sublicht-mikroskopisch-morphologische Untersuchungen des anorganischen Knochenanteils.
Acta Anat. 20, Basel (1954)
6. Benninghoff, A.: Über die Anpassung der Knochencompacta an geänderte Beanspruchungen.
Anat. Anz. 63, (1927)

7. Benninghoff, A., K. Goerttler: Lehrbuch der Anatomie des Menschen.
Urban & Schwarzenberg, 10. Aufl., Berlin,
München, Wien, (1968)
8. Brandt, G., H.H. Pesch, U. Zeus, D. Lutz: Eisen-
und Blutbildung im Femurmark des Erwachsenen
Verh. Dtsch. Ges. Path., 58 (1974)
9. Brandt, G.; Mineralanalytische und histometrische
Studien am menschlichen Knochenmark.
Med. Welt (im Druck) (1974)
10. Bourne, G.H.: Chemistry and Physiology of Bone.
Acad Press, New York (1955)
11. Brandenberger, E., H.R.Schinz: Exper. 4,59
(1948)
12. Brasseur, H., M. J. Dallmagne, J. Melon: Exper.4,
421 (1948)
13. Caldwell, R.A., D. H. Collins: Assessment of
Vertebral Osteoporosis by Radiographic and
Chemical Methods Post-Mortem. The J. of
Bone and Joint Surgery 43B 346-361 (1961)
14. Chalmers, H.: Osteoporosis in: Clinics in Endo-
crinology and Metabolism, Distribution of
Osteoporotic Changes in the Ageing Skeleton,
W.B. Saunders Com. Ltd. London (1973)

15. Catel, W.: Gefügekundliche Untersuchungen über
Struktur und Funktion des coxalen Femuren-
des des Menschen.
E. d. Anat. u. Entwickl.-Gesch. 43,3, Sprin-
ger, Berlin, Heidelberg, New York (1970)
16. Dallmagne, M. J.: Acta. biol. belg. 1,374 (1941)
17. Demmler, K.: Beziehung zwischen Mark und Knochen
bei Osteoporosen. Med. klin. 70: 41-88
(1975)
18. Ebner, v. V.: Über den feineren Bau der Knochen-
substanz.
S.-B. Akad. Wiss. 72, Wien (1875)
19. Eichler, J.: Inaktivitätsosteoporose durch Ruhig-
stellung im Gipsverband
Fortschr. Med. 88, Heft 5 (1970)
20. Fricke, M., E. Krokowski: Neue Aspekte zur Ent-
stehung und Behandlung der Osteoporose
Therapiewoche 24 (1975)
21. Gebhardt, W.: Über funktionell wichtige Anforde-
rungsweisen der feineren und gröberen Bau-
elemente des Wirbeltierknochens
Wilh. Roux Arch. Entwickl.-Mech. Org. 20
187-322 (1906)

22. Glimcher, M.J.: Specificity of the Molecular
Structure of Organic Matrices in Minerali-
sation. In: Calcification in Biological
Systems. Amer. Assoc. for the Advance of
Sc., Washington (1960)
23. Haasner, E., E. Krokowski, K. Rach: klin. Wschr.
45, 575 (1967)
24. Heuck, F., E. Schmidt: Die quantitative Bestim-
mung des Mineralgehaltes des Knochens aus
dem Röntgenbild.
Röfo 93,5 (1960)
25. Heuck, F., E. Schmidt: Die praktische Anwendung
einer Methode zur quantitativen Bestimmung
des Kalksalzgehaltes gesunder und kranker
Knochen
Röfo 93,6 (1960)
26. Heuck, F.: Ergebnisse chemisch-analytischer und
histo-radiographischer Untersuchungen der
Knochensalze bei Osteopathien
Verh. Dtsch. Ges. Path. 47, Tg. (1963)
27. Hoppe-Seyler/Thierfelder: Analyse, 10. Aufl.
Band V :

28. Jesserer, H.: Klinische Formen der Osteoporose
und ihre prognostisch-therapeutische Bewertung
Therapiewoche 34 (1974)
29. Jesserer, H.: Osteoporose: Pathologie, Klinik und
Therapie
Therapiewoche 29 (1975)
30. Jowsey, J., G. Gordan: Bone Turnover and Osteoporosis. In: G.H. Bourne: The Biochemistry and Physiology of Bone
Vol. III, Acad. Press, New York, London
(1971)
31. Knese, K.H.: Knochenstruktur als Verbundbau.
Zwanglose Abhandlung aus dem Gebiet der
normalen und pathologischen Anatomie, H.4,
Thieme, Stuttgart (1958)
32. Knief, H.J.: Quantitative Untersuchung der Verteilung der Hartsubstanzen im Knochen in ihren Beziehungen zur lokalen mechanischen Beanspruchung.
Z. Anat. Entwickl.-Gesch. 126 (1967)
33. Knief, J.J.: Materialverteilung und Beanspruchungsverteilung im coxalen Femurende.
Z. Anat. Entwickl.-Gesch. 126 (1967)

34. Krempien, B., D. Baumann, Ch. Manegold, H. Wesch,
P. Griss: Skelethomöostase und Alter. Untersuchungen an menschlichen Femora.
Verh. Dtsch. Ges. Path., 59. Tg., Gustav Fischer, Stuttgart (1975)
35. Krokowski, E.: Frühdiagnose und Verlauf der Osteoporose
Münch. Med. Wo.-Schr. 29 1981-1984 (1967)
36. Krokowski, E.: Osteoporose - kein Kalziummangel-syndrom
Med. Klin. 66, 1770-1776 (1971)
37. Krokowski, E.: Die postmenopausische Osteoporose ein Zeitabschnitt im normalen Knochenumbau.
Med. Klin. 69 2100 - 2105 (1974)
38. Krokowski, E.: Radiologie der Osteoporose.
Therap. Wo. 34 (1974)
39. Krokowski, E.: Osteoporose - mehr als eine Knochenkrankheit!
Med. Klin. 70, 822 - 829 (1975)
40. Kruse, H.P.: Histologie der Osteoporose.
Verh. Dtsch. Ges. Orthop. Traumat., 57.
Kongr. Stuttgart (1971)

41. Küntscher, G.: Der Nachweis von Spannungsspitzen
am menschlichen Knochengerüst
Morph. Jb. 75, 427-444 (1935)
42. Küntscher, G.: Die Spannungsverteilung am Schenkelhals
Langenbecks Arch. klin. Chir., 185, 308-321
(1936)
43. Kuhlencordt, F.: Osteoporose
Verh. Dtsch. Ges. Orthop. Traumat., 57.
Kongr. Stuttgart (1971)
44. Kummer, B.: Funktioneller Bau und funktionelle
Anpassung des Knochens
Anat. Anz. 111, 261-293 (1962)
45. Kummer, B.: Die Beanspruchung des menschlichen
Hüftgelenks.
Z. Anat. Entwickl.-Gesch. 127, 277-285
(1968)
46. Lang, K.: Anorganische Stoffe. In: Hoppe-Seyler/
Thierfelder Analyse, 10. Auflage, Band III
47. v. Lanz/Wachsmuth: Praktische Anatomie. I. Band
4. Teil: Bein und Statik. 2. Aufl. Springer,
Berlin-Heidelberg-New York (1972)

48. Luther, R.: Vergleichende Untersuchungen über
den Mineralsalzgehalt von Calcaneus und
Wirbelkörper (eine Überprüfung der Korre-
lation unter Verwendung eines neuen Unter-
suchungsverfahrens).
Habilitationsschrift, Erlangen (1975)
49. Lutz, D.: Mineral- und Spurenelementgehalt am
menschlichen Femur.
Med. Diss. Erlangen (1974)
50. Meunier, P., P. Courpron, C. Edouard, J. Bernard,
J. Bringuier, G. Vignon: Osteoporosis. In:
Clinics in Endocrinology and Metabolism.
Physiological Senile Involution and Patho-
logical Rarefication of Bone. W.B. Saunders
Comp. Ltd. London (1973)
51. Morgan, B.: Osteoporosis, in: Clinics in Endo-
crinology and Metabolism. Ageing and Osteo-
porosis, in Particular Spinal Osteoporosis.
W.B. Saunders Comp. Ltd. London (1973)
52. Neuman, Neuman: The Chemical Dynamics of Bone
Mineralisation. The University of Chicago
Press (1958)

53. Nordin, B.E.C.: in: Frost, H.M.: Bone Biodynamics
Little Brown, Boston (1963)
54. Nordin, B.E.C.: Triangel (Sandoz) 6, (1964)
55. Nordin, B.E.C.: Osteoporosis in: Clinics in Endo-
crinology and Metabolism. W.B. Saunders
Comp. Ltd. London (1973)
56. Pauwels, F.: Die Bedeutung der Bauprinzipien des
Stütz- und Bewegungsapparates für die Be-
anspruchung der Röhrenknochen
Z. Anat. Entwickl.-Gesch. 114, 129-166 (1948)
57. Pauwels, F.: Über die mechanische Bedeutung der
gröberen Corticalisstruktur beim normalen
und pathologisch verbogenen Röhrenknochen
Anat. Nachr. 1, 53-67 (1949)
58. Pauwels, F.: Über die Verteilung der Spongiosa-
dichte im coxalen Femurende und ihre Bedeu-
tung für die Lehre vom funktionellen Bau
des Knochens. In: Gesammelte Abhandlungen
zur funktionellen Anatomie des Bewegungs-
apparates, 386-399. Springer Berlin-Heidel-
berg-New York (1965)
59. Pesch, H.J., G. Brandt, D. Lutz: Beitrag zur Mine-
ralpathologie des Knochens.
Verh. Dtsch. Ges. Path. 57, 467 (1973)

60. Pesch, H.J., G. Brandt, M. Kahle, H. Prestele,
W. Schuster, B. Schorn, R. Luther: V er-
gleichende klinische und pathologisch-ana-
tomische Untersuchungen zur quantitativen
Erfassung des Spongiosaabbaues in Lenden-
wirbelkörpern und im Schenkelhals mit zu-
nehmenden Lebensalter.
Verh. Dtsch. Ges. Path. 59. Tg. Stuttgart
(1975)
61. Roux, W.: Die Entwicklungsmechanik der Organismen.
Eine anatomische Wissenschaft der Zukunft.
Urban & Schwarzenberg, Berlin-München-Wien
(1880)
62. Roux, W.: Beiträge zur Morphologie der funktionel-
len Anpassung. In: Gesammelte Abhandlungen ü-
ber die Entwicklungsmechanik der Organismen.
Ed. I, Engelmann, Leipzig (1895)
63. Roux, W.: Über die Dicke der statischen Elementar-
teile und die Maschenweite der Substantia
spongiosa der Knochen.
Z. Orthop. Chir. 4, 284 - 306 (1896)
64. Roux, W.; C. C örrens, A. Fischel: Die Entwick-
lungsmechanik.
Engelmann, Leipzig (1905)

65. Schmidt, H.: Der Mineralgehalt im Knochen-
lumen und Frischgewicht. Vergleichende Un-
tersuchungen am III. und V. Lendenwirbelkör-
per und Femurhals in verschiedenen Lebens-
altern.
Med. Diss. Erlangen (in Vorbereitung)
66. Schmidt, K.W.:
Med. Diss. Erlangen (1974)
67. Schmidt, W.J.: Über homogene und sphäritische Ver-
kalkung bei den verschiedenen Arten des
Knochengewebes
Nat. Wiss. 34, 273-277 (1947)
68. Schütte, E.: Mineralisation des Knochens als Stoff-
wechselprozeß.
Verh. Dtsch. Ges. Path. 47. Tg., 31-35
(1963)
69. Schuhknecht, W.: Die Flammenspektralanalyse. In:
Die Chemische Analyse Bd. 48, 146ff, Enke,
Stuttgart (1961)
70. Uehlinger, E.: Allgemeine Pathologie der Osteopo-
rose und ihre reparativen Möglichkeiten.
Therap. Woche 34 (1973)
71. Uehlinger, E.: Pathologische Anatomie und Pathoge-
nese der Osteoporose. Therap. Woche 34 (1974)

72. Virtama, P.: Determination of the Mineral Content of Human Finger Bones by Silver Analysis of Roentgenograms
Act. anat. 31 (1957)
73. Wagner, A.: Zur Diagnose und Behandlung der Osteoporose.
Der Landarzt, 44, 1749-1759 (1968)
74. Wagner, H.: Präsenile Osteoporose
Thieme, Stuttgart (1965)
75. Ward, F.O.: Zit. nach H.H. Knief, Z. Anat. Entwickl.-Gesch. 126, 55-80 (1967)
76. Weber, H.C., E.D. Eanes, R.J. Gerdes: Electron Microscope Study of Non-Crystalline Calcium Phosphate.
Arch. Biochem. 120, 723-724 (1967)
77. Wolff, H.: Über die innere Architektur der Knochen und ihre Bedeutung für die Frage vom Knochenwachstum.
Virch. Arch. Path. Anat. 50, 389-450 (1870)
78. Zeiger, K.: Das Problem der funktionellen Struktur des Knochens, Natur u. Museum 63, 77-91 (1933)

7. Danksagung

Für die Aufnahme als Doktorand an seiner Klinik, die Bereitstellung eines Arbeitsplatzes und die großzügige Unterstützung meiner Arbeit schulde ich Herrn Prof. Dr. D. Hohmann (Dir. der orthopädischen Universitätsklinik) größten Dank.

Ebenso danke ich Herrn Prof. Dr. H. Behrens (Dir. des I. anorganischen Instituts für Chemie) und seinen Mitarbeitern für die Benützung der Arbeitsgeräte und Meßapparaturen und für ihren fachmännischen Rat bei einigen chem.-technischen Problemen.

Mein Dank gilt auch Herrn Prof. Dr. L. Horbach (Dir. des Instituts für med. Datenverarbeitung und Dokumentation) und seinen Mitarbeitern Herrn Dipl.Math. Seibold und Herrn Dipl.Phys. Probst, die mich in allen statistischen Fragen tatkräftig unterstützten.

Weiter möchte ich Herrn Dr. med. habil. Brandt (Patholog. Institut, Dir. Prof. Dr. V. Becker) für seine Anregungen und Hinweise bei der Ausarbeitung des Themas danken.

Einen ganz besonderen und aufrichtigen Dank möchte ich Herrn Priv. Doz. Dr. R. Luther (Chefarzt der orthopädischen Abteilung der Klinik Dr. Erler)

entgegenbringen, der mir das Thema anbot, mich bestens betreute, jederzeit für meine Probleme ein offenes Ohr hatte und schließlich entscheidend das Gelingen dieser Arbeit ermöglichte.

Nicht vergessen habe ich die Damen und Herren, die teilweise hier nicht oder an anderer Stelle genannt sind, aber durch Anregungen und tatkräftige Hilfe zur Vorbereitung und Ausarbeitung des Themas beitrugen.

8. Lebenslauf

Am 9. Januar 1949 wurde ich als erster Sohn des Ehepaares Leonhard und Anna Weiß in Amberg geboren.

Nach fünf Volksschuljahren besuchte ich neun Jahre das Gregor-Mendel-Gymnasium in Amberg, wo ich im neusprachlichen Zweig am 28. Juni 1969 das Reifezeugnis erhielt.

Im Herbst des selben Jahres schrieb ich mich an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen für das Fach Medizin ein.

Nach dem Physikum im Frühjahr 1972 begann ich Anfang 1973 mit meiner Doktorarbeit. 1973/74 verbrachte ich mit Hilfe eines DAAD-Stipendiums ein Studienjahr an der Medizinischen Fakultät in

Grenoble (Frankreich).

Als Famulus arbeitete ich längere Zeit in der Schweiz und in Frankreich. Zurückgekehrt nach Erlangen bestand ich hier am 3. Februar 1976 das Medizinische Staatsexamen. Seit 20. April 1976 arbeite ich auf der Chirurgischen Abteilung des Städt. Krankenhauses in Amberg als Medizinalassistent.

Erlangen, im Januar 1977

Werner Leonhard Josef W e i ß

Offsetdruck-Fotodruck

J. Hög, 8520 Erlangen, Hauptstr. 109 (Nähe Martin-Luther-Platz) Tel. 22990